



مطالعه سایش ابزار در فرز کاری کامپوزیت A356-10%SiC تحت شرایط خنک کاری برودتی

قاسم نجفی¹، سید علی نیکنام^{2*}، بهنام داودی³، ویکتور سانگمن⁴

1- دانشجوی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

4- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، اکول تکنولوژی مونترال، کانادا

* تهران، صندوق پستی 1311416846، saniknam@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

چکیده

دریافت: 1402/05/28

پذیرش: 1402/10/26

کلیدواژگان

کامپوزیت پایه فلزی،

آلومینیوم،

ماشین کاری،

خنک کاری برودتی،

سایش ابزار

کامپوزیت‌ها موادی ترکیبی با حداقل دو ماده هستند که یکی به عنوان زمینه و دومی به منظور افزایش خواص مفید به ماده پایه افزوده می‌شود. این مطالعه نیز در مورد یکی از کامپوزیت‌های پرکاربرد تحت عنوان کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی به همراه مواد تقویت‌کننده افزودنی شامل سیلیکون کارباید SiC است. از جمله مزایای این کامپوزیت‌ها می‌توان به مواردی مثل سختی و استحکام بالا و همین‌طور سبکی اشاره نمود. همچنین معایب آن قابلیت ضعیف ماشین‌کاری و سایش بالا در ابزارهای ماشین‌کاری است. تاکنون مطالعات متعددی برای بهبود قابلیت ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی انجام گرفته است. بر اساس پیشینه پژوهش انجام‌شده در این حوزه، تحقیقات محدودی در مورد تأثیر روش‌های مختلف خنک‌کاری، بخصوص خنک‌کاری برودتی و استراتژی‌های مرتبط بر سایش و عمر ابزار برشی در ماشین‌کاری کامپوزیت‌های پایه فلزی صورت گرفته است. لذا در این مطالعه اثر پارامترهای برشی و خنک‌کاری برودتی بر سایش ابزار در ماشین‌کاری A356-10%SiC مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس تحلیل‌های آماری صورت‌گرفته مشاهده شد که اثر پارامترهای برشی و پارامترهای خنک‌کاری برودتی بر اندازه سایش ابزار محسوس بوده (R^2 برابر با 0.97) و رابطه ریاضیاتی قوی بین سایش ابزار و پارامترهای مطالعه شده وجود دارد. همچنین با مقایسه مطالعات پیشین، می‌توان اذعان نمود که عمر ابزار برشی نسبت به حالت خشک تا 26٪ افزایش یافته است.

Study of the tool wear in cryogenic milling of A356-10%SiC

Ghasem Najafy¹, Seyed Ali Niknam^{1*}, Behnam Davoodi¹, Victor Songmene²

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure, Montreal, Canada

* P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, saniknam@iust.ac.ir

Keywords

Metal matrix composite,
Aluminium alloys,
Machining,
Cryogenic cooling,
Tool wear

Abstract

Composites are combined with at least two materials; one is considered as the base material and later is used to improve the material properties. This study is also about one of the widely used composites so-called aluminium metal matrix composites (Al-MMC) and additional reinforcing particles, including silicon carbide (SiC). The main features of such composite are high hardness and strength, as well as lightweight. The main disadvantages are low machinability and high wear in cutting tools. Several studies have been conducted to improve the machinability of MMCs. The literature review in this domain denotes that limited studies have yet been conducted on the effects of different cooling methods, especially cryogenic cooling and related strategies, on the wear and tool life in the machining of MMCs. Therefore, in this study, the effects of cutting parameters and cryogenic cooling on the tool wear in the machining of A356-10%SiC were studied. Based on the statistical analysis, it was observed that the effects of cutting parameters and cryogenic cooling parameters on the tool wear was significant ($R^2=0.97$) and a robust mathematical relationship exists between tool wear and the studied parameters. Moreover, compared with previous studies, it was observed that tool life under cryogenic conditions was increased by around 26% compared to readings made under dry condition.

1- مقدمه

از دیرباز تمام کشورهای صنعتی به دنبال موادی با نسبت استحکام به وزن بالا هستند که بتوانند علاوه بر کاهش هزینه مواد اولیه، باعث کاهش انرژی مصرفی و کاهش آلودگی زیست محیطی شوند. از این رو نیاز است تا با آزمایش ها و همچنین تحقیقات متنوع در مورد عناصر و افزودنی های مفید و تأثیر آن روی ماده پایه، کامپوزیت ها را هر چه بیشتر مورد بررسی قرارداد [1]. کامپوزیت های زمینه فلزی¹ با زمینه آلیاژهای سبک از قبیل منیزیم و آلومینیوم و تقویت شده با ذرات سرامیکی از قبیل کارباید سیلیسیوم، آلومینا و زیرکونیا را می توان به عنوان دسته ای از مواد پیشرفته در نظر گرفت که دارای وزن کم، استحکام بالا، مدول الاستیسیته زیاد، ضریب حرارتی کم و مقاومت به سایش خوب هستند. این مواد به دلیل خواص ویژه شان در سال های اخیر کاربرد بسیاری در صنایع هوایی، خودروسازی، نظامی و... پیدا کرده اند [2،3،4].

علی رغم افزایش تقاضا برای کامپوزیت زمینه فلزی در محصولات هوافضا و خودروسازی، کماکان مشکلات ماشین کاری آن ها حل نشده باقی مانده است [5]. ویژگی های خاص کامپوزیت های زمینه فلزی در طول ماشین کاری، منجر به توانایی پایین ماشین کاری آن ها شده است [6]. تحقیقات اولیه در بهبود کیفیت ماشین کاری کامپوزیت های زمینه فلزی از سال 1980 شروع شده است. اخیراً استفاده از کامپوزیت زمینه فلزی به امری عادی در صنایع هوافضا و خودروسازی تبدیل شده است [7] که با عنایت به مشکلات مرتبط با ماشین کاری این دسته از مواد، می تواند محل هزینه بالایی در ماشین کاری آن ها باشد [8]. از این رو تلاش های کمی به تولید مدل های پیش بینی عمر ابزار در ماشین کاری کامپوزیت زمینه فلزی معطوف شده است. جهت درک بهتر و بیشتر رفتار این مواد، مطالعات بیشتری نیاز است [4]. با این حال و بر مبنای بعضی از مطالعات انجام یافته، ابزار کاربایدی یک جایگزین مناسب تحت شرایط خاص است [9].

در زمانی که سایش ابزار به سرعت شروع می شود، پارامترهای مختلف برای تعیین شرایط مناسب ابزار مورد بررسی قرار می گیرند، [9، 10]. تجزیه و تحلیل پدیده های حرارتی که در بین جت نیتروژن مایع با پاشش خارجی و قطعه کار رخ می دهد مورد مطالعه قرار گرفت [11]. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، نسبت فاز مایع/گاز نیتروژن تأثیر قابل توجهی بر انتقال حرارت دارد. در این تحقیق برای تعیین تأثیر پارامترهای جت LN2 بر ضریب انتقال حرارت همرفتی، مدلی بر اساس طراحی آزمایش بر روی قطعه کار مجهز به ترموکوپل پیشنهاد شد. بر اساس نتیجه حاصله، تأثیرگذارترین پارامترهای توزیع حرارتی و ضریب انتقال حرارت عبارتند از فشار LN2، قطر نازل، زاویه تزریق مایع برشی و فاصله بین نازل و سطح قطعه. مضافاً قطر نازل بیشترین اثر را داشته به طور مستقیم با مقدار LN2 مرتبط است. با کاهش فاصله، LN2 پتانسیل کمتری برای انتقال گرما با محیط خود دارد و در نتیجه می تواند مدت بیشتری در فاز مایع خود باقی بماند [11].

سرمایش برودتی یک روش سازگار با محیط زیست است که برای از بین بردن اثرات منفی تولید گرما و دماهای بالا در منطقه برش استفاده می شود. در روش برودتی می توان از مایعات برودتی مختلف مانند نیتروژن و دی اکسید کربن در دماهای بسیار پایین (حدود 200- درجه سانتی گراد) استفاده کرد. این خنک کننده گرما را در ناحیه ماشین کاری جذب کرده و مانعی بین تراشه و ابزار ایجاد می کند. در یک فرآیند براده برداری، مایع

خنک کننده برودتی از طریق شیلنگ های برودتی از مخزن به ماشین ابزار منتقل می شود و از داخل یا خارج ابزار برش به منطقه ماشین کاری تزریق می شود. استفاده از خنک کننده برودتی با LN2 به کاهش دما، زبری سطح، سایش پهلوه و نیروهای برشی در مقایسه با خنک کننده معمولی کمک می کند. پژوهش مشابهی بر بروی آلیاژ AA 6061-T6 نیز منجر به کاهش 27 الی 44 درصدی دما شد [12].

2- ضرورت انجام پژوهش و اهداف طرح

در پایان جمع آوری اطلاعات و مطالعات مرتبط به کامپوزیت پایه آلومینیومی مشاهده گردید که میزان مطالعات در کامپوزیت ها همواره با بررسی افزودن مواد تقویت کننده SiC در سال های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. با این حال، مطالعات تکمیلی در خصوص بررسی روش های خنک کاری پایدار، بخصوص برودتی و پارامترهای آن و مقایسه عملکرد این روش با دیگر روش های خنک کاری محدود بوده و در مورد بررسی مستقیم پارامترهای برودتی در حین ماشین کاری اطلاعات چندانی برای کامپوزیت های پایه فلزی موجود نیست. از این رو هدف از پژوهش صورت گرفته بررسی اثرات پارامترهای مؤثر برشی بر قابلیت ماشین کاری کامپوزیت زمینه آلومینیومی و بهبود عمر ابزار برشی و همچنین مقایسه روش خنک کاری برودتی جهت یافتن شرایط خنک کاری مناسب و بهینه در ماشین کاری این نوع مواد از دیگر اهداف متصور است. مراحل مطالعه به این شرح انجام شد. ابتدا پارامترهای مؤثر در ماشین کاری برودتی مشخص و طرح آزمایشی مناسب انتخاب گردید. سپس سیستم برودتی مطابق پارامترهای ورودی در طرح آزمایشی طراحی و ساخته شد سپس بهینه سازی در عملکرد سیستم تزریق نیتروژن مایع صورت پذیرفت و تنظیمات لازم مطابق طراحی آزمایش در محل ماشین کاری انجام شد. با توجه به این که روش برودتی یک روش پایدار است هیچ خطری برای اپراتور و محیط زیست ندارد. بررسی نتایج و کارآمدی روش برودتی برای افزایش عمر ابزار برشی نیز در بخش های آتی ارائه می شود.

3- روش تحقیق

با استفاده از روش ریخته گری همزنی، قطعه های مکعبی شکل کامپوزیتی A356 با 10% SiC با ابعاد $22 \times 11.5 \times 1.5$ سانتی متر ساخته و آماده شد که با نام تجاری A356-10%SiC نشان داده می شود. بعد از پایان عملیات ریخته گری، برای اطمینان از توزیع درست ذرات تقویت کننده و تولید کامپوزیت با کیفیت، مطابق شکل 1، یک قسمت از نمونه ریخته گری شده پولیش شده و با میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. به جز چند نقطه که این ذرات به هم چسبیده شده اند، تقریباً در بقیه نقاط نشست یکسان مشاهده شد. با توجه به این نکته که تولید کامپوزیتی که مقدار SiC به کاررفته در آن در هیچ منطقه ای به هم نچسبیده باشند تقریباً غیرممکن است، لذا جهت اطمینان بیشتر، از تصاویر تحلیل مپ قطعات کامپوزیتی با دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای انجام آزمایش های فرزندکاری، پارامترهای برشی مطابق مشاوره های فنی با شرکت سازنده ابزار انتخاب گردید. برای روش برودتی² مؤثرترین پارامترهای یافت شده در ماشین کاری برودتی، انتخاب گردید. جدول شماره 1 و طرح آزمایشی تاگوچی L9 به همراه یک بار تکرار مطابق جدول شماره 2 استفاده شد.

² cryogenic

¹ Metal matrix composite

برشکاری، قطعه کار، فرز CNC، تشکیل شده است (شکل 2). برای اطمینان از فشار مخزن، یک سیستم تخلیه سریع نیز استفاده گردید و برای کنترل جریان خروجی و جلوگیری از هدررفت نیتروژن مایع یک شیر جریان قبل از نازل قرار گرفت.

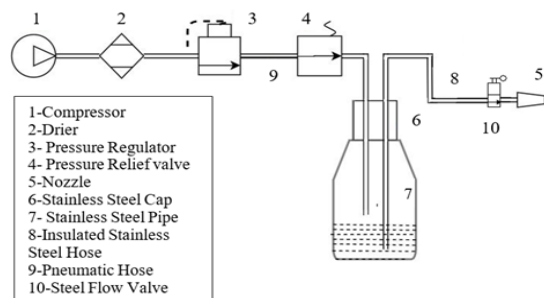


Fig. 2 Liquid nitrogen injection system

شکل 2 سیستم تزریق نیتروژن مایع

5- نحوه استقرار تجهیزات تزریق نیتروژن

نازل برودتی با استفاده از فیکسچر مناسب برای تنظیم موقعیت و زاویه 45 درجه مورد استفاده قرار گرفت. تمرکز تزریق نیتروژن مایع بر روی خنک سازی نوک ابزار است. نحوه قرارگیری نازل در شکل 3 مشاهده می شود.

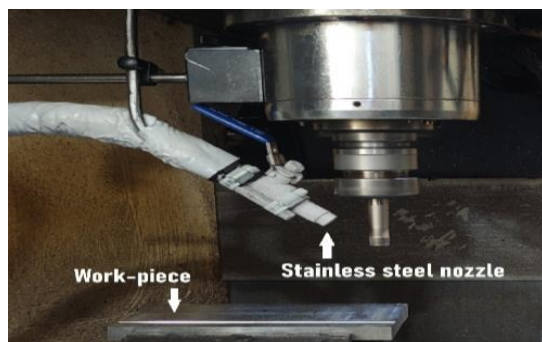


Fig. 3 How to place the nozzle in the milling machine

شکل 3 نحوه قرارگیری نازل در دستگاه فرزکاری

6- ابزار برشی

اینسرت مدل HM90 APKT 100304PDR در فرزکاری استفاده شد. مشخصات این اینسرت به همراه سه ناحیه اصلی برشی ابزار در شکل 4 نشان داده شده است. ناحیه اصلی برش در بررسی عمر ابزار مطابق استاندارد ISO3685:1993 در عمق سایش ابزار در زاویه پهلوی ابزار (Flank wear) به میزان 300 میکرون برای سایش خراشیدگی (Abrasion) می باشد.

7- تجزیه و تحلیل

بیشترین سایش ابزار در بین مواد ارائه شده اندازه گیری و به صورت نمودار و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در انتهای این بخش آورده شده است. برای اطمینان از تحلیل درست، از نتایج آنالیز مپ و آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس¹ استفاده شد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، مکانیسم اصلی سایش، پدیده خراشیدگی² است. با توجه به آنالیز مپ (شکل 5) عناصر موجود در روکش یعنی، تیتانیم، نیتروژن و آلومینیوم در سطح ابزار از بین رفته و به

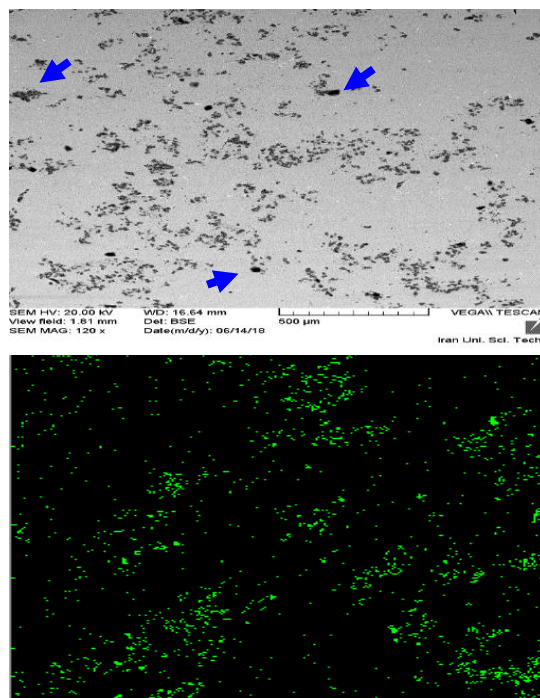


Fig. 1 SEM image of A356 -10 % SiC

شکل 1 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز مپ از ماده کامپوزیت آلومینیومی به همراه 10% SiC

جدول 1 پارامترهای ماشین کاری و برودتی

Table 1 Machining and cryogenic cooling parameters

پارامتر	پارامترهای برشی	شرایط آزمایش
A	قطر نازل (mm)	1.5, 2.5, 3.5
B	فشار برودتی (bar)	1.5, 2.5, 3.5
C	فاصله نازل (mm)	15, 30, 45
D	سرعت برشی (m/min)	120, 180, 240
	پیشروی (mm/z)	0.1
	عمق برش (mm)	1
	مدل روان کاری	برودتی

جدول 2 طراحی آزمایش با روش تاگوچی DOE و L₉

Table 2 The DOE-L₉ orthogonal array used

شماره آزمایش	قطر نازل (mm)	فشار برودتی (bar)	فاصله نازل (mm)	سرعت برشی (m/min)
1	1.5	1.5	15	120
2	1.5	2.5	30	180
3	1.5	3.5	45	240
4	2.5	1.5	30	240
5	2.5	2.5	45	120
6	2.5	3.5	15	180
7	3.5	1.5	45	180
8	3.5	2.5	15	240
9	3.5	3.5	30	120

4- ساخت سیستم تزریق نیتروژن مایع

سیستم تزریق نیتروژن مایع عمدتاً از یک کمپرسور باد، مخزن نیتروژن مایع، سیستم خشک کننده هوا، شلنگ استیل، نازل و فیکسچر نگهدارنده نازل و ابزار

¹ EDS

² Abrasion

ماشین کاری، آنالیز مپ با عناصری همچون (پ) آلومینیوم، (ت) سیلیکون، (ج) تیتانیوم، (چ) تنگستن

فرزکاری کامپوزیت زمینه فلزی A356/10%SiC با استفاده از روش برودتی انجام و میزان سایش پهلویی در ابزارهای برشی بررسی شد. نتایج حاصله در پایان با مشاهدات انجام یافته در مطالعات پیشین تیم تحقیقاتی حاضر که با استفاده از روش های خنک کاری خشک، حداقل روانکار و غوطه وری در شرایط برشی مشابه انجام شده بودند مقایسه گردید [13].

سایش ابزار

با استفاده از آنالیز واریانس، میزان $R^2 = 0.97$ نشان دهنده این است که این روش ماشین کاری بر روی این ماده با در نظر گرفتن شرایط تعریف شده مطلوب و مناسب می باشد. پارامترهای برشی با سایش ابزار رابطه خطی داشته و با استاندارد بر شکل 6 می توان نتیجه گرفت که هرچه سرعت برشی بالاتر رود، میزان سایش در اینسرت ها نیز افزایش یافته است. با مقایسه نتایج حاصله با پژوهش های پیشین می توان اذعان کرد به طور کلی میزان تشکیل لایه انباشته در سرعت برشی 120 متر بر دقیقه در روش های خشک و برودتی بیشتر از دو روش دیگر بود و در سرعت 180 متر بر دقیقه روش های خشک و حداقل روانکار بیشتر بود و روش برودتی کمی بیشتر از روش غوطه وری بود (به جز آزمون شماره 2 برودتی که تقریباً با روش غوطه وری برابر بود). در سرعت برشی 240 متر بر دقیقه روش های خشک و حداقل روانکار بیشترین لایه انباشته را نسبت به بقیه روش ها داشتند، ولی روش برودتی تقریباً برابر و در برخی موارد کمتر از روش غوطه وری بود.

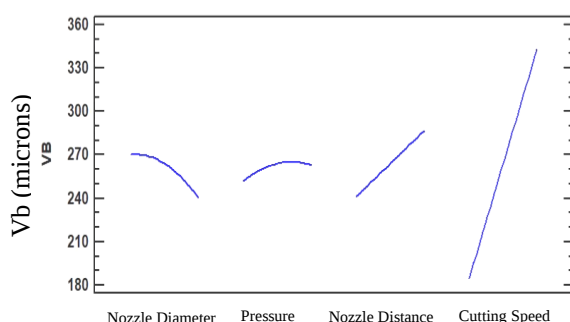


Fig. 6 Main effects plot for flank wear

شکل 6 نمودار تأثیر پارامترهای برشی بر سایش ابزار

به منظور تعیین عمر ابزار برشی و مشاهده روند سایش در ابزار برشی تصویر پهلوی ابزار برشی در مقطع هایی از مسیر ماشین کاری در شرایط مختلف سرعت برشی، قطر نازل و فاصله نازل و همچنین فشار در حالت خنک کاری برودتی، مورد بررسی قرار گرفت و سایش ابزار اندازه گیری شد. بر اساس مشاهدات تجربی، در سرعت برشی 120 متر بر دقیقه کمترین میزان سایش ابزار را نسبت به سرعت های دیگر مشاهده شد. بر اساس تحلیل های آماری، سایش پهلویی ابزار تابعی از پارامترهای برشی و خنک کاری برودتی بوده و اگرچه حضور ذرات SiC باعث افزایش سایش می شود، لیکن سایش کمکان به صورت تابعی خطی از تغییرات پارامترهای برشی قابل بیان است. با افزایش قطر نازل نیز سایش ابزار کاهش یافته که با توجه به افزایش حجم مایع تزریقی به محل ماشین کاری، نسبت مایع به گاز در نقطه ماشین کاری افزایش و با کاهش دمای بیشتری همراه بود. در نتیجه سایش ابزار در اثر حرارت کاهش خواهد یافت. همچنین فاصله نازل نیز رابطه خطی با سایش ابزار دارد و با

علت وجود ذرات SiC در سطح براده، بخصوص در قسمت هایی که عناصر روکش حذف گردیده است، پدیده سایش به خاطر برخورد ابزار با ذرات سخت SiC اتفاق افتاده است. وجود حجم زیاد از آلومینیوم در لبه ابزار نیز نشان دهنده تشکیل لبه انباشته و لایه انباشته است. وجود اکسیژن مبین پدیده اکسیداسیون است.

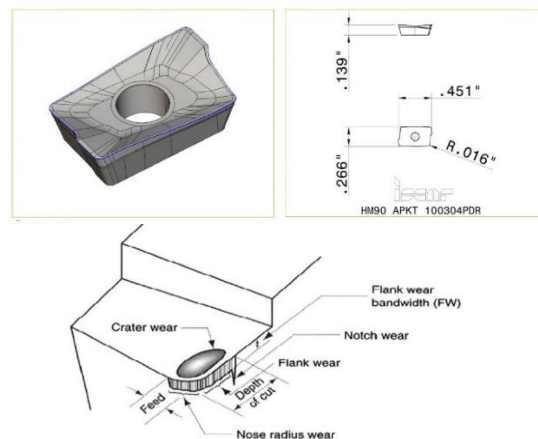


Fig. 4 The specifications of the insert used and the three main tool wear areas

شکل 4 مشخصات اینسرت استفاده شده در فرزکاری و سه ناحیه اصلی سایش در لبه برشی ابزار

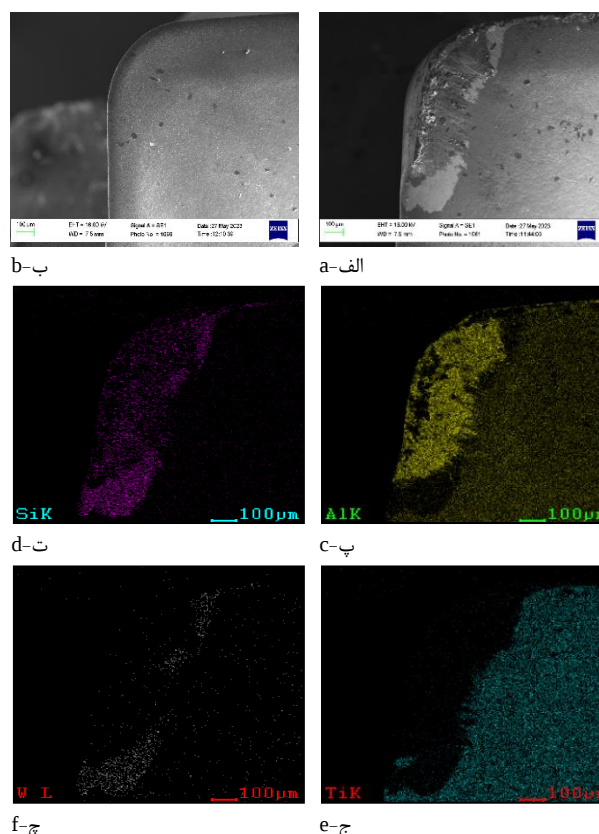


Fig. 5 SEM image and surface map analysis of the cutting tool in cryogenic mode at cutting speed of 120 m/min; (a) before machining; (b) after machining; mapping analysis with presence of (c) Aluminium; (d) Silicon; (e) Titanium; (f) Tungsten

شکل 5 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز مپ سطح ابزار برش در حالت برودتی با سرعت 120 متر بر دقیقه در حالات (الف) قبل از ماشین کاری، (ب) بعد از

است. می توان گفت روش برودتی در سرعت برشی 120 و 180 متر بر دقیقه موفق تر از روش های دیگر می باشد. با توجه به میزان سایش پهلویی ابزارها در حالات مختلف خنک کاری در سرعت برشی 240 متر بر دقیقه، افزایش عمر ابزار نسبت به حالت خشک حدود 20% بود و در حالت حداقل روانکار نسبت به حالت خشک 38% بالاتر و در حالت غوطه وری حدود 29% بود. در نتیجه در سرعت برشی 240 متر بر دقیقه روش خنک کاری حداقل روانکار موفق تر از بقیه روش ها است. البته در ادامه فرایند روش حداقل روانکار عملکرد مثبت خود را از دست داده و به شدت عمر ابزار کاهش می یابد، ولی روش غوطه وری در حفظ عمر ابزار بهتر عمل می کند.

به طور کلی، پیدایش لایه و لبه انباشته در ماشین کاری کامپوزیت های زمینه آلومینیومی با توجه به اینکه آلومینیوم فلزی چکش خوار و نرم است امری معمول است. با اعمال سیال برشی نیز مقدار و اندازه لایه و لبه انباشته تغییر می کند. روکش ابزار کاربیدی کارایی مناسبی در برابر مکانیسم سایش که بر اثر تماس با ذرات تقویت کننده SiC ایجاد می شود را نداشته و به سرعت ساییده شده و از بین می رود. با اعمال سیال برشی در روش های حداقل روانکار، غوطه وری و برودتی از سرعت تشکیل لبه انباشته کاسته می شود، زیرا سیال برشی به سرعت به منطقه برشی برخورد می کند و علاوه بر اینکه محیط را برای چسبیدن براده به سطح ابزار نامساعد می کند، اگر براده به سطح ابزار چسبیده باشد آن را کنده و اجازه بزرگ تر شدن آن را نمی دهد. بنابراین ذرات براده چسبیده شده بر سطح ابزار در این روش بیشتر به صورت لایه انباشته است. بخصوص در روش برودتی که دمای بسیار پایین تری ایجاد می کند، میزان لبه انباشته در سرعت های کمتر بسیار کم، ولی لایه انباشته بالاتری ایجاد می گردد و با افزایش سرعت برشی میزان لایه انباشته کاهش و لبه انباشته افزایش می یابد. استفاده از سیال برشی در سه روش حداقل روانکار، غوطه وری و برودتی سرعت سایش را کاهش می دهد. در سرعت برشی ثابت، مقدار سایش پهلویی ابزار برشی در حالت خشک به نسبت سه روش دیگر بیشتر است. راندمان و کارایی روش های خنک کاری در همه سرعت ها یکسان نبوده و در برخی سرعت ها مخصوصاً در حالت حداقل روانکار نسبت به حالت خشک بهبود چشمگیری ایجاد نکرد. در سرعت برشی بالا، روش غوطه وری به علت اینکه مقدار دبی سیال برشی در آن نسبت به حالت حداقل روانکار بیشتر است، در کاهش سایش پهلویی نسبت به حالت فرزکاری حداقل روانکار و خشک عملکرد بهتری داشته و مقدار سایش ابزار برشی را نسبت به سه روش دیگر بیشتر کاهش داده است. به عبارت دیگر شیب نمودار سایش ابزار در این روش کمتر از حالت حداقل روانکار حداقل روانکار و خشک است. ولی در سرعت پایین تر روش برودتی عملکرد بهتری دارد.

8- نتیجه گیری

از بررسی نتایج آزمون ها در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، آنالیز طیفسنجی پراش انرژی پرتو ایکس، آنالیز مپ و تحلیل های آماری صورت گرفته، نتایج زیر به دست آمد:

- اثرگذاری پارامترهای برشی و برودتی بر روی میزان سایش ابزار به کمک تحلیل آماری $R^2=0.97$ را نشان داد که از نظر آماری قابل اتکا بوده و سایش ابزار ارتباط مستقیم با پارامترهای برشی به کاررفته دارد. شرایط بهینه پارامترهای برودتی برای کمترین سایش ابزار در قطر نازل بزرگتر (3.5) و کمترین فاصله نازل تا قطعه (1.5) و در فشار مخزن متوسط (2.5) ایجاد گردید.

افزایش فاصله ابزار، سایش ابزار نیز افزایش می یابد. از این رو می توان گفت علت این امر تبخیر سریع مایع نیتروژن در برخورد با هوای محیط است. نکته قابل توجه در این نمودار این است که با افزایش فشار برودتی تغییر چشمگیری در سایش ابزار به وجود نیامد.

با استناد به شکل 7، می توان اذعان کرد که ابتدا سرعت برشی و در درجه دوم قطر نازل بیشترین تأثیر را بر سایش ابزار دارند. علت این امر را می توان افزایش دبی خروجی نیتروژن مایع و همچنین مطابق با آن، افزایش نسبت مایع به گاز در لحظه برخورد به لبه ابزار دانست. در رتبه سوم مؤثرترین پارامتر نیز فاصله نازل است که با نزدیک تر شدن به لبه برشی نسبت مایع به گاز را در مسیر برخورد حفظ می کند و همچنین رابطه بین قطر نازل و فشار در اولویت چهارم پارامترهای مؤثر است. نکته جالب در این نمودار تأثیر پارامتر فشار است که به تنهایی هیچ تأثیر قابل توجهی بر سایش ابزار ندارد.

با مقایسه میزان سایش ابزارها در هر یک از شرایط برشی استفاده شده، می توان اذعان کرد که کمترین سایش ابزار در سرعت برشی 120 متر بر دقیقه اتفاق افتاد. در شرایط یکسان برشی و در مقایسه با حالت خشک، عمر ابزار 5 تا 25% افزایش یافته است. این در حالی است که روش حداقل روانکار حدود 5% و روش غوطه وری حدود 13% نسبت به حالت خشک در سرعت افزایش عمر ابزار را به همراه داشته اند. جزییات آنالیز واریانس انجام شده در جدول شماره 3 مشاهده می شود. در این نمودار VC سرعت برشی و D قطر نازل و L فاصله نازل تا قطعه کار و P فشار کرایونیک می باشد.

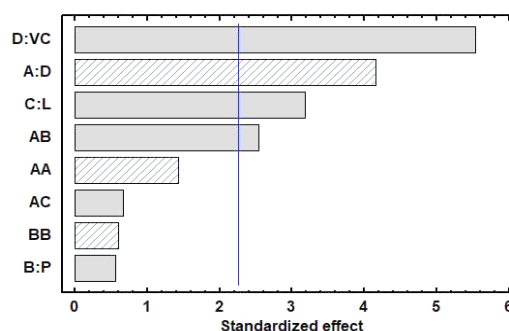


Fig. 7 Standardized Pareto chart for flank wear with $R^2=0.97$

شکل 7 نمودار Pareto سایش ابزار با $R^2=0.97$

جدول 2 آنالیز واریانس سایش ابزار

Table 2 Analysis of variance of tool wear

منبع	مجموع مربعات	DF	میدان متوسط	P-Value
A:D	2655.19	1	2655.19	0.0025
B:P	47.25	1	47.25	0.5927
C:L	1552.69	1	1552.69	0.0112
D:VC	4710.69	1	4710.69	0.0004
AA	315.063	1	315.063	0.1859
AB	992.25	1	992.25	0.0316
AC	69.0312	1	69.0312	0.5195
BB	56.3333	1	56.3333	0.5598
Ttal error	1382.63	9	153.625	
Total (corr.)	46177.1	17		

با توجه به سایش ابزارها در سرعت برشی 180 متر بر دقیقه، افزایش عمر ابزار در روش برودتی نسبت به حالت خشک حدود 17% تا 25% است. ولی در حالت حداقل روانکار حدود 16% و در حالت غوطه وری حدود 18.5%

- by in situ technique," Materials Science and Engineering: A, vol. 428, no. 1-2, pp. 34-40, 2006.
- [9] Said, M. S., Yusoff, M. S. and Hassan, C. H., "Tool wear in machining AlSi/AlN metal matrix composite 10 wt% reinforcement using uncoated cutting tool," In applied mechanics and materials, Vol. 465, no. 1, pp. 973-977, 2014.
- [10] Sougavabar, M. A., Niknam, S. A., Davoodi, B. and Songmene, V., "Milling Al520-MMC reinforced with SiC particles and additive elements Bi and Sn," In Persian. Materials, Vol. 15, NO. 4, pp. 1533, 2022.
- [11] Wang, Yongqing, et al. "Research on surface heat transfer mechanism of liquid nitrogen jet cooling in cryogenic machining," Applied Thermal Engineering, pp. 179, 2020.
- [12] Sarikaya, Murat, et al. "Cooling techniques to improve the machinability and sustainability of lightweight alloys: A state-of-the-art review." Journal of Manufacturing Processes, Vol. 62 pp. 179-201, 2021.
- [13] Saberi, M., Niknam, S. A., Hashemi, R., "On the impacts of cutting parameters on surface roughness, tool wear mode and size in slot milling of A356 metal matrix composites reinforced with silicon carbide elements" Journal of Engineering Manufacture., Vol. 235, no. 10, pp. 1655-1667, 2021.

- مؤثرترین پارامترها برای سایش پهلوی ابزار به ترتیب سرعت برشی، قطر نازل و فاصله نازل تا سطح قطعه نازل بود. فشار برودتی به‌تنهایی هیچ تأثیر مثبتی در روند سایش ابزار نداشت.
- مکانیسم اصلی سایش در فرزکاری کامپوزیت A356، مکانیسم خراشیدگی بود که بر اثر برخورد ذرات تقویت‌کننده SiC و کشیده شدن آن‌ها بر روی لایه روکش ابزار اتفاق می‌افتد.
- تقریباً در تمامی آزمون‌های فرزکاری، پدیده‌های اصلی سایش در سطح براده و پهلویی ابزار برشی پدیده خراشیدگی، لایه و لبه انباشته است. با توجه به اینکه کامپوزیت‌ها ریخته‌گری شده هستند، دارای سختی بالایی نیستند، بنابراین دما در ناحیه برش به حدی زیاد نمی‌شود که مناسب دیگر مکانیسم‌های سایش باشد.
- برخلاف برخی تحقیقات صورت‌گرفته که استفاده از سیال برشی در ماشین‌کاری کامپوزیت‌ها را مفید نمی‌دانند یا به‌عبارت دیگر معتقد هستند که استفاده از سیال در ماشین‌کاری با عدم استفاده سیال برشی تفاوتی نمی‌کند، سایش ابزار برشی در هر سه روش خنک‌کاری اعمالی کاهش یافت. در فرزکاری خشک، مقدار سایش پهلوی ابزار نسبت به روش‌های MQL و غوطه‌وری و برودتی بیشتر بود.
- فرزکاری با روش غوطه‌وری بهترین عملکرد را در کاهش لایه و لبه انباشته داشته است و در مواردی تصور می‌شود که حتی با عملکرد مناسب در کاهش درجه حرارت و ضریب اصطکاک از تشکیل لبه انباشته جلوگیری کرده است.

9- تقدیر و تشکر

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

10- منابع

- [1] Alipour Sougavabar, M., Niknam, S. A., Davoodi, B., "Study of tool flank wear and surface quality in milling of Al520-MMCs reinforced with SiC and Sn particles," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 2, pp. 1970-1975, 2023.
- [2] Paulo Davim, J., "Diamond tool performance in machining metal-matrix composites," Journal of materials processing technology, vol. 128, no. 1-3, pp. 100-105, 2002.
- [3] António, C. C. and Davim, J. P., "Optimal cutting conditions in turning of particulate metal matrix composites based on experiment and a genetic search model," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 33, no. 2, pp. 213-219, 2002.
- [4] Nicholls, C. J., Boswell, B., Davies, I. J. and Islam, M. N., "Review of machining metal matrix composites," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 33, no. 1, pp. 2429-2441, 2017.
- [5] Gururaja, S., Ramulu, M. and Pedersen, W., "Machining of MMCs: a review," Machining Science and Technology, vol. 17, no. 1, pp. 41-73, 2013.
- [6] Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S. T., "Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 57, no. 1, pp. 83-101, 2012.
- [7] Aronson, R. B., "Machining composites," Manufacturing engineering, vol. 122, no. 1, 1999.
- [8] Rai, R. N., Datta, G., Chakraborty, M. and Chattopadhyay, A., "A study on the machinability behaviour of Al-TiC composite prepared



ارزیابی ترک زمینه در کامپوزیت‌های متعامد به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت‌شونده لمب

امیررضا امیری‌نژاد¹، سیاوش کاظمی‌راد^{2*}، محمود مهرداد شکریه³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* skazemirad@iust.ac.ir، 16846-13114 صندوق پستی

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/06/13

پذیرش: 1402/09/20

کلیدواژگان

امواج هدایت‌شونده، موج لمب،

کامپوزیت متعامد، چگالی ترک،

مدل‌سازی اجزای محدود

ارزیابی غیرمخرب خواص مکانیکی و پایش سلامت سازه‌های کامپوزیتی از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این پژوهش، ارائه یک روش ارزیابی غیرمخرب بر پایه گسترش امواج لمب برای بررسی آسیب ترک زمینه در کامپوزیت‌های لایه‌ای است. بدین منظور، پس از ایجاد مدل اجزای محدود یک کامپوزیت شیشه/اپوکسی، رفتار موج لمب در دو مود پادمقارن (A_0) و مقارن (S_0) با فرکانس‌های تحریک مختلف مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، نمودارهای پراکندگی مود A_0 و S_0 موج لمب با در نظر گرفتن چگالی ترک‌های متفاوت به دست آمدند. مشاهده شد که چگالی ترک زمینه و افت خواص مکانیکی کامپوزیت‌های متعامد بر روی سرعت مود S_0 موج لمب بیشتر از سرعت مود A_0 تأثیرگذار است. همچنین، تشخیص ترک زمینه به کمک افت سرعت موج لمب در فرکانس‌های بالا و نزدیک به فرکانس قطع دقیق‌تر انجام شد. مشاهده شد که با افزایش چگالی ترک، فرکانس قطع کاهش یافت و همچنین با افزایش تعداد لایه‌های 90 درجه در کامپوزیت متعامد، افت سرعت موج لمب بیشتر شد. نتیجه‌گیری شد که روش شبیه‌سازی گسترش امواج لمب می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی برای ارزیابی غیرمخرب کامپوزیت‌ها و تشخیص چگالی ترک زمینه در آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

Evaluation of matrix cracking in cross-ply composites using the finite element simulation of guided Lamb wave propagation

Amirreza Amirinejad¹, Siavash Kazemirad^{1*}, Mahmood Mehrdad. Shokrieh¹

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*P.O. Box 16846-13114, Tehran, Iran, skazemirad@iust.ac.ir

Keywords

Guided waves, Lamb wave, Cross-ply composite, Crack density, Finite element modeling

Abstract

Nondestructive evaluation of mechanical properties and health monitoring of composite structures is of great importance. The aim of this research was to propose a nondestructive evaluation method based on the propagation of Lamb waves to investigate the matrix cracking damage in laminated cross-ply composites. For this purpose, after developing the finite element model of a glass/epoxy composite, the Lamb wave behavior was studied in two antisymmetric (A_0) and symmetric (S_0) modes with different excitation frequencies. The dispersion curves of the A_0 and S_0 modes of the Lamb wave are then obtained by considering different crack densities. It was observed that the effect of matrix crack density and the loss of mechanical properties of the cross-ply composites on the phase velocity of the S_0 Lamb wave mode was higher than that of the A_0 mode. Furthermore, the detection of matrix cracking was better performed using the Lamb wave velocity at high frequencies close to the cut-off frequency. It was observed that the cut-off frequency decreased by increasing the crack density, and the drop in the Lamb wave velocity increased by increasing the number of 90° layers in the cross-ply composite. It was concluded that the Lamb wave propagation simulation method can be used as a virtual laboratory for nondestructive evaluation of composites and detection of matrix crack density in them.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Amirinejad, A., Kazemirad, S., Shokrieh, M. M., "Evaluation of matrix cracking in cross-ply composites using the finite element simulation of guided Lamb wave propagation." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2257-2265, 2024.

https://doi.org/10.22068 /JSTC.2023.2009321.1852

1- مقدمه

کامپوزیت ماده‌ای غیرایزوتروپیک بوده که از اجزای مختلفی تشکیل شده است. تقویت‌کننده‌ها و ماده زمینه اجزای تشکیل‌دهنده مواد کامپوزیتی بوده که هر کدام دارای خواص مکانیکی متفاوتی هستند. ماده کامپوزیتی، معمولاً دارای خواص مکانیکی ویژه‌ای است [1]. با افزایش کاربرد کامپوزیت‌ها، شناخت دقیق مکانیزم‌های خرابی در این مواد شامل ترک ماده زمینه، تورق، شکستگی الیاف، گسیختگی، کشیدگی الیاف، میکرو کمناش، تاب برداشتن اتصال و ترکیبی از این مکانیزم‌ها برای طراحی ایمن باید مورد توجه قرار گیرد.

ترک زمینه معمولاً اولین آسیبی است که وقتی یک چندلایه‌ی کامپوزیتی تحت بارگذاری کششی شبه استاتیکی یا چرخه‌ای قرار می‌گیرد، رخ می‌دهد [2]. ترک زمینه یکی از شایع‌ترین آسیب‌ها در کامپوزیت‌ها است اما این نوع آسیب به خودی خود منجر به واماندگی سازه‌ای نمی‌شود بلکه می‌تواند آغازگر حالت‌های دیگر واماندگی مانند تورق و شکست الیاف باشد. ترک‌ها در راستای ضخامت به دلیل استحکام/سفتی بسیار پایین ماتریس در مقایسه با الیاف تقویت‌کننده ایجاد می‌شوند. این امر باعث بزرگ‌نمایی کرنش در ماتریس در جهت خارج از محور می‌شود. از آنجایی که نسبت کرنش به واماندگی لایه‌ی خارج از محور به طور قابل‌توجهی پایین‌تر از لایه‌ی هم‌راستا با بارگذاری است، ترک‌خوردگی در راستای ضخامت ایجاد می‌شود. به همین ترتیب، ترک‌های عرضی به دلیل عدم تطابق بین نسبت پواسون درون صفحه‌ای لایه‌ها در جهت‌های بارگذاری شده و خارج از محور رخ می‌دهد [3]. این نوع از آسیب معمولاً در حین سرویس‌دهی در اثر کشش، خستگی و بارگذاری ضربه‌ای رخ داده و تحت تأثیر رفتار ماده زمینه پلیمری قرار دارد [4].

استفاده از روش‌های مبتنی بر گسترش امواج لمب¹ برای ارزیابی و آزمایش غیر مخرب سازه‌های کامپوزیتی بسیار رایج است [5-8]. میرایی کم و ماهیت فرکانس بالای امواج لمب باعث شده از آن‌ها برای ارزیابی سریع سازه‌ها و تشخیص عیوب استفاده شود. برای مثال، مردانشاهی و همکاران [9] به کمک گسترش امواج هدایت‌شده لمب خواص الاستیک و ویسکوالاستیک کامپوزیت‌های متعادل پلیمری را تخمین زدند. آن‌ها به کمک این روش، موفق به شناسایی و طبقه‌بندی ترک ماده زمینه در این کامپوزیت‌ها شدند. در تحقیقی دیگر، مردانشاهی و همکاران [10] به مطالعه بر روی تشخیص و طبقه‌بندی ترک زمینه در کامپوزیت‌های چندلایه با استفاده از انتشار امواج لمب و به کمک هوش مصنوعی پرداختند. آن‌ها یک مدل هوشمند برای تشخیص و طبقه‌بندی خودکار ماتریس پیشنهاد دادند. رضائی و همکاران [11] در رویکردی تجربی و تحلیلی به بررسی اثرات افزودن نانوالیاف کربنی بر کاهش ترک‌خوردگی ماده زمینه در کامپوزیت‌های چندلایه به کمک روش گسترش امواج لمب پرداختند. ایلماز² و همکاران [12]، بر روی تعیین غیر مخرب ماتریس سفتی سازه کامپوزیت چندلایه به کمک گسترش امواج لمب تحقیق کردند.

محققین زیادی از روش شبیه‌سازی المان محدود به‌عنوان یکی از روش‌های حل عددی برای مطالعه گسترش امواج هدایت‌شونده در سازه‌های متفاوت استفاده می‌کنند [13]. برای مثال، مردانشاهی و همکاران [14] بر روی شبیه‌سازی اجزای محدود موج لمب به منظور پایش غیرمخرب ترک زمینه در کامپوزیت‌های چندلایه تحقیق کردند. آن‌ها دریافتند که روش گسترش موج لمب شبیه‌سازی‌شده می‌تواند در نظارت بر کامپوزیت‌های چندلایه دارای ترک زمینه کمک شایانی کند. همچنین، پروری و همکاران [15] بر روی ارزیابی غیرمخرب سازه‌های دولایه فلز-کامپوزیت به کمک شبیه‌سازی اجزای محدود

گسترش امواج هدایت‌شونده لمب تحقیق کردند. دنگ³ و همکاران [16] نیز تحقیقاتی را بر روی روش مدل‌سازی ساده‌شده آسیب ضربه برای شبیه‌سازی عددی گسترش موج لمب در سازه‌های کامپوزیتی شبه همسانگرد انجام دادند. آن‌ها گزارش کردند که پیش‌بینی آسیب‌های میکروسکوپی مانند لایه‌لایه شدن، ترک‌های برشی و ترک‌های عرضی، به طور دقیق دشوار است.

با توجه به پیچیدگی انجام آزمایش‌های گسترش امواج لمب، پیچیدگی احتمالی ماده مورد مطالعه، شرایط مرزی و غیره برای تشخیص عیوب مختلف از جمله ترک زمینه، شبیه‌سازی عددی گسترش امواج لمب کمک می‌کند تا درک بهتری از آزمایش صورت گیرد و با کمترین هزینه یک مدل قابل‌اتکا برای بررسی گسترش امواج لمب در کامپوزیت‌ها حاصل شود.

هدف پژوهش حاضر ارائه یک آزمایشگاه مجازی دقیق و قابل‌اطمینان برای بررسی توانایی روش گسترش امواج لمب در ارزیابی غیرمخرب آسیب ترک زمینه در کامپوزیت‌های متعادل با لایه چینی دلخواه است. همچنین به منظور تعیین فرکانس تحریک و مود مناسب موج لمب برای ارزیابی آسیب ترک زمینه در کامپوزیت‌های متعادل، سرعت موج مودهای پادمتقارن A_0 و متقارن S_0 موج لمب در نرم‌افزار شبیه‌ساز عددی آباکوس در دو لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ برای قطعات سالم و ترک‌دار با چگالی ترک‌های متفاوت در یک محدوده فرکانسی نسبتاً گسترده مورد بررسی قرار گرفت.

2- مواد و روش‌ها

در این مطالعه شبیه‌سازی گسترش امواج لمب برای دو لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ با جنس یکسان (شیشه/اپوکسی) و چگالی ترک‌های متفاوت 0.05، 0.1 و 0.15 و $\frac{1}{mm}$ در فرکانس‌های تحریک 25، 50، 75، 100، 125، 150، 175، 200 و 225 کیلوهرتز مورد بررسی قرار گرفته است. در هر دو لایه چینی، هندسه قطعه مورد بررسی ثابت بوده است.

1-2- خواص ماده کامپوزیتی

خواص مکانیکی تک لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی که در شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب در کامپوزیت‌های مورد مطالعه استفاده شده، در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی تک لایه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی استفاده‌شده در شبیه‌سازی اجزای محدود [9]

Table 1 The mechanical properties of the glass/epoxy composite layer used in the finite element simulation [9]

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	$G_{12}=G_{13}$ (GPa)	G_{23} (GPa)	$\nu_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}$	t_{ply} (mm)	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)
31.3	9.5	9.5	4.12	3.653	0.27	0.197	1750

2-2- هندسه شبیه‌سازی‌شده

در شبیه‌سازی اجزای محدود، مکعبی به طول 205 میلی‌متر، عرض 5 میلی‌متر و با ضخامت 3.152 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه هر دو لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ دارای 16 لایه با ضخامت هر لایه 0.197 میلی‌متر بودند، ضخامت قطعه مدل شده 3.152 میلی‌متر به دست آمد. شکل 1 هندسه ایجادشده در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس را نشان می‌دهد.

برای ایجاد ترک زمینه با چگالی‌های مختلف در نمونه کامپوزیتی شبیه‌سازی‌شده، ترک‌های عرضی با ضخامت 5 میکرومتر در لایه‌های 90 درجه نمونه ایجاد شد. پس از ایجاد این ترک‌ها، برای ناحیه ترک خواص مکانیکی

³ Deng

¹ Lamb waves

² Yilmaz

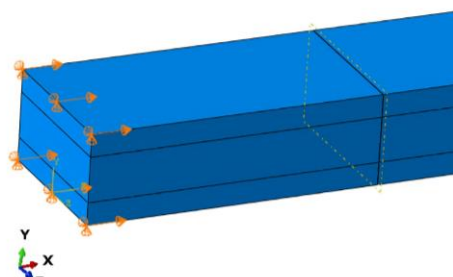


Fig. 4 The excitation exerted to the specimen for generating the S_0 Lamb wave mode in it

شکل 4 تحریک اعمال شده به نمونه برای ایجاد مود S_0 موج لمب در آن

اندازه المان‌ها و طول بازه زمانی^۲ دو پارامتر بسیار مهم در شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت‌شونده لمب می‌باشند. طول بازه زمانی که دقت محاسبات عددی شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب را تضمین می‌کند مطابق معادله (1) به دست می‌آید [17]:

$$\Delta t \approx \frac{(l_e)_{\min}}{c_p} = \frac{1}{20f_{\max}} \quad (1)$$

که در آن Δt طول بازه زمانی، $(l_e)_{\min}$ کوچک‌ترین اندازه المان در مدل اجزای محدود، $f_{\max}$ بیشینه فرکانس اعمالی و c_p سرعت موج فشاری است. همچنین طبق منابع موجود برای تضمین دقت محاسبات و نتایج به دست آمده وجود 10 نود در هر طول موج ضرورت دارد [17, 18]. با توجه به اینکه طول موج امواج برشی نسبت به امواج فشاری کوتاه‌تر است، رابطه بین اندازه المان‌ها با سرعت موج برشی به صورت معادله (2) خواهد شد:

$$l_e = \frac{\lambda_{\min}}{20} \approx \frac{c_s}{20f_{\max}} \quad (2)$$

که در آن $\lambda_{\min}$ طول موج و c_s سرعت موج برشی است. در این مطالعه برای شبیه‌سازی گسترش امواج لمب در نرم‌افزار آباکوس از حلگر غیرضمنی^۳ استفاده شد. در این تحلیل از المان‌های سه‌بعدی مکعبی خطی هشت نقطه‌ای (C3D8) استفاده شد که در شکل 5 تصویر این المان‌ها دیده می‌شود.

همچنین حسگرها^۴ در فواصل مشخصی از عملگر جهت محاسبه سرعت فاز موج لمب گسترش‌یافته روی سطح نمونه قرار داده شده که فاصله آن‌ها از یکدیگر 20 میلی‌متر بوده است. سرعت مودهای A_0 و S_0 موج لمب گسترش‌یافته در نمونه‌های کامپوزیتی شبیه‌سازی شده با استفاده از دو روش مختلف محاسبه شدند. در روش اول با داشتن فرکانس تحریک و محاسبه طول موج از روی شکل موج، سرعت موج لمب گسترش‌یافته در نمونه‌های کامپوزیتی با ضرب طول موج در فرکانس تحریک محاسبه شد. برای کاهش خطای این روش، فاصله چند طول موج از روی شکل موج استخراج و سپس این طول تقسیم بر تعداد طول موج‌های در نظر گرفته شده گردید تا مقدار یک طول موج به طور دقیق‌تری محاسبه شود. همچنین در روش دوم، سرعت مودهای A_0 و S_0 موج لمب گسترش‌یافته در نمونه‌های کامپوزیتی به کمک اختلاف زمانی رسیدن موج به حسگرهای مختلف محاسبه شد. شکل 6 جایگاه قرارگیری حسگرها روی نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

بسیار پایین‌تر از لایه‌های کامپوزیتی سالم اختصاص داده شد. شکل 2 ترک‌های زمینه ایجاد شده در نمونه کامپوزیتی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس را نشان می‌دهد.

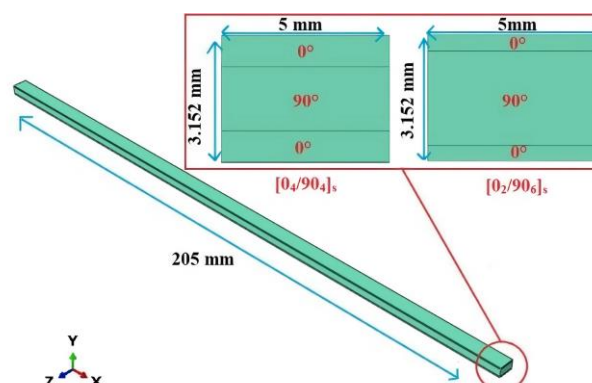


Fig. 1 The geometry of the composite specimens simulated in ABAQUS
شکل 1 هندسه نمونه‌های کامپوزیتی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

3-2- اعمال تحریک و مش بندی

با توجه به اینکه هر دو مود A_0 و S_0 موج لمب در این مقاله مورد مطالعه قرار گرفت، بهترین نحوه ایجاد این دو مود موج لمب به کمک تحریک‌های اعمال شده به نمونه در شکل‌های 3 و 4 نمایش داده شده است. تحریک‌های اعمال شده یک جابجایی سینوسی متناوب با دامنه 1.0 میکرومتر در محل عملگر^۱ و با فرکانس‌های بین 25 تا 250 کیلوهرتز بوده است.

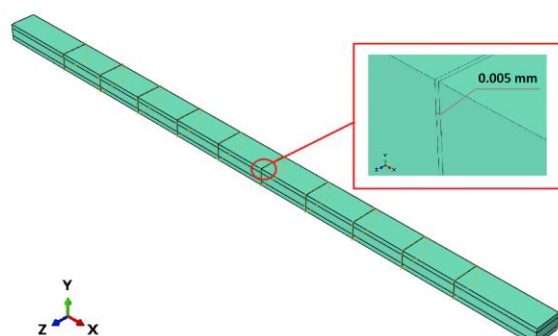


Fig. 2 Creating of cracks in the 90° layers of the composite specimen
شکل 2 ایجاد ترک زمینه در لایه‌های 90° درجه نمونه کامپوزیتی

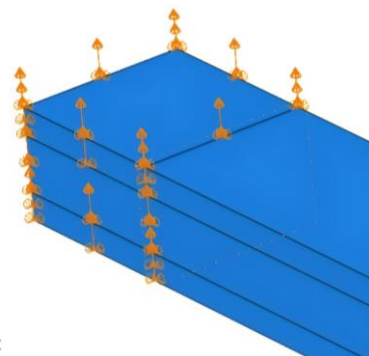


Fig. 3 The excitation exerted to the specimen for generating the A_0 Lamb wave mode in it

شکل 3 تحریک اعمال شده به نمونه برای ایجاد مود A_0 موج لمب در آن

³ Explicit solver

⁴ Sensors

¹ Actuator

² Time Interval length

آمده در جدول 2 نمایش داده شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، اندازه المان 0.5 میلی‌متر برای انجام شبیه‌سازی گسترش موج لمب در این فرکانس مناسب بوده است.

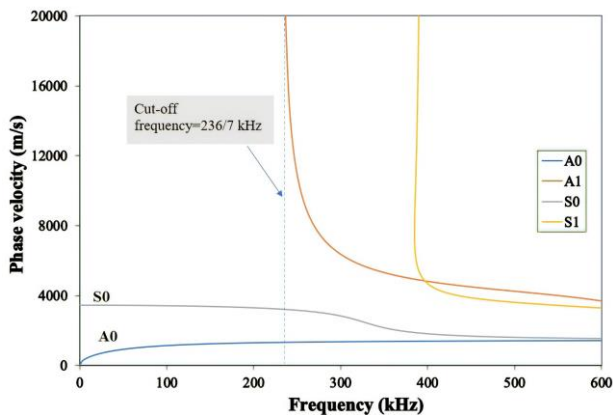


Fig. 7 The dispersion curves of Lamb wave modes obtained using the Dispersion Calculator software for a 3.152 mm thick glass-epoxy composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$
شکل 7 نمودار پراکندگی مدهای موج لمب برای نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ با ضخامت 3.152 mm که با استفاده از نرم‌افزار Dispersion Calculator به دست آمده است

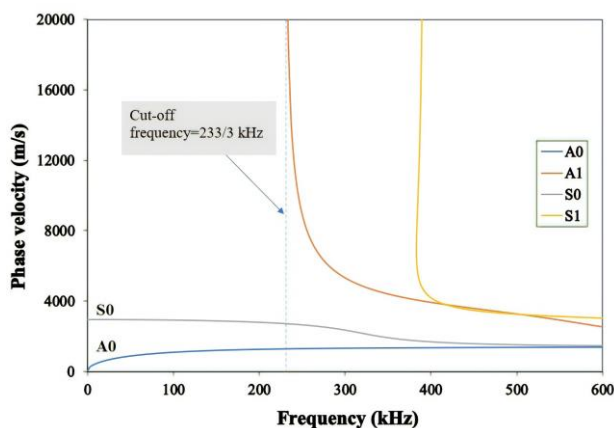


Fig. 8 The dispersion curves of Lamb wave modes obtained using the Dispersion Calculator software for a 3.152 mm thick glass-epoxy composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$
شکل 8 نمودار پراکندگی مدهای موج لمب برای نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ با ضخامت 3.152 mm که با استفاده از نرم‌افزار Dispersion Calculator به دست آمده است

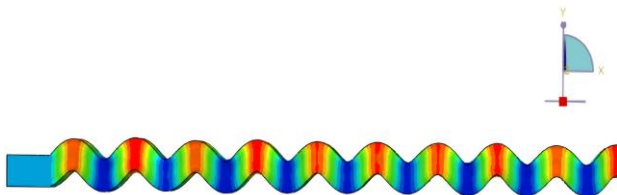


Fig. 9 Propagation of A_0 Lamb wave mode with the frequency of 175 kHz in the intact glass/epoxy composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$

شکل 9 گسترش مود A_0 موج لمب در نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ در فرکانس 175 کیلوهرتز

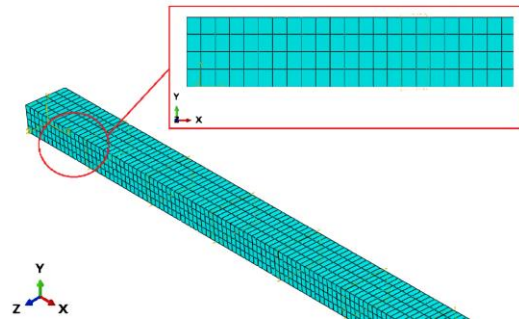


Fig. 5 The elements type used in the developed model

شکل 5 نوع المان‌های به کاررفته در مدل توسعه‌یافته

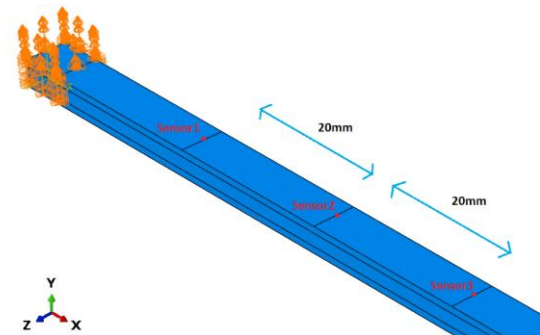


Fig. 6 The position of the sensors on the composite specimens

شکل 6 جایگاه حسگرها روی نمونه کامپوزیتی

نمودار پراکندگی مدهای مختلف موج لمب برای نمونه‌های کامپوزیتی سالم با لایه چینی‌های $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ که با استفاده از نرم‌افزار Dispersion Calculator که مبتنی بر روابط المان محدود نیمه‌تحلیلی¹ است استخراج شده، به ترتیب در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده است. در لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ فرکانس قطع 236.7 کیلوهرتز و در لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ فرکانس قطع 233.3 کیلوهرتز محاسبه شد.

3- نتایج و بحث

شکل 9 جابجایی در راستای ضخامت در یک نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ را که مود A_0 موج لمب با فرکانس 175 کیلوهرتز در آن گسترش یافته نشان می‌دهد. همچنین شکل 10 جابجایی در راستای ضخامت در یک نمونه کامپوزیتی شیشه/پوکسی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ را که مود S_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در آن گسترش یافته نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود یک موج سینوسی منظم با کمک تحریک اعمال‌شده در محیط شبیه‌سازی اجزای محدود در نمونه‌های تحت بررسی گسترش یافته است.

شکل 11 سیگنال جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ را نشان می‌دهد که مود A_0 موج لمب با فرکانس 175 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، از این سیگنال‌ها برای محاسبه سرعت موج لمب استفاده شده است.

برای بررسی استقلال نتایج خروجی از اندازه شبکه مش‌بندی، سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس 206 کیلوهرتز در یک نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ برای اندازه المان‌های مختلف محاسبه شد که نتایج به دست

¹ Semi-analytical finite element

در نمونه‌های کامپوزیتی تأیید شد. همچنین مردان‌شاهی و همکاران [9] در مطالعه تجربی خود، سرعت مود A_0 موج لمب در فرکانس 206 کیلوهرتز در یک نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ را 1361 متر بر ثانیه اندازه‌گیری کردند. این مقدار با سرعت مود A_0 موج لمب حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود مطالعه جاری در فرکانس 206 کیلوهرتز در یک نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ (1265 متر بر ثانیه) حدود 7 درصد اختلاف داشت که بار دیگر صحت شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب در نمونه کامپوزیتی را تأیید می‌کند.

در جدول‌های 3 تا 6 مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس تحریک، سرعت موج لمب برای مدهای A_0 و S_0 به ترتیب افزایش و کاهش پیدا می‌کند. همچنین در یک فرکانس ثابت، با افزایش تعداد لایه‌های صفر درجه در نمونه کامپوزیتی سالم سرعت موج لمب برای مدهای A_0 و S_0 به دلیل افزایش سفتی معادل نمونه در راستای گسترش موج افزایش پیدا کرد. به عبارت دیگر، سرعت موج لمب در یک فرکانس ثابت به تعداد لایه‌های صفر درجه حساسیت نشان داد که این موضوع می‌تواند در پژوهش‌های آینده برای تشخیص جهت لایه‌ها در نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول 3 سرعت مود A_0 موج لمب برای نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ محاسبه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار

Dispersion Calculator

Table 3 The A_0 Lamb wave velocity for the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ calculated from the finite element simulation and Dispersion Calculator software

فرکانس (kHz)	سرعت موج Dispersion Calculator (m/s)	سرعت موج شبیه‌سازی (m/s)	درصد اختلاف
25	702.8	707.5	0.6
50	919.36	900	2.1
75	1047.51	1050	0.2
100	1131.6	1120	1
125	1190	1200	0.84
150	1232.26	1223.77	0.68
175	1263.94	1254.36	0.75
200	1288.41	1287.42	0.07
225	1307.84	1312.5	0.35
250	1326.63	1325	0.12

جدول 4 سرعت مود S_0 موج لمب برای نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ محاسبه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار Dispersion Calculator

Table 4 The S_0 Lamb wave velocity for the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ calculated from the finite element simulation and Dispersion Calculator software

فرکانس (kHz)	سرعت موج Dispersion Calculator (m/s)	سرعت موج شبیه‌سازی (m/s)	درصد اختلاف
25	3450.86	3478.25	0.79
50	3445.38	3520	2.18
75	3435.99	3420	0.46
100	3422.24	3413.33	0.26
125	3403.45	3333.33	2.0
150	3378.5	3300	2.3
175	3345.8	3237.5	3.2
200	3302.47	3225	2.3
225	3243.85	3075	5.2
250	3161.23	3125	1.1

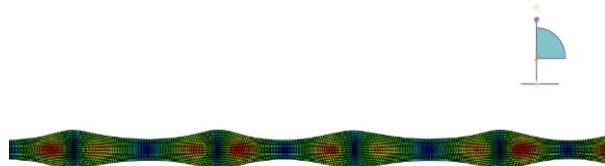


Fig. 10 Propagation of S_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz in the intact glass/epoxy composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$

شکل 10 گسترش مود S_0 موج لمب در نمونه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ در فرکانس 200 کیلوهرتز

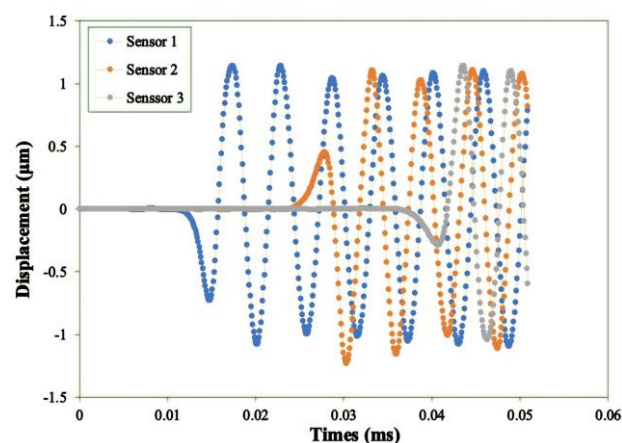


Fig. 11 The displacement-time diagram of sensors located on the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ in which the A_0 Lamb wave mode with the frequency of 175 kHz was propagated

شکل 11 نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ که مود A_0 موج لمب با فرکانس 175 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است

جدول 2 بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی گسترش موج لمب از اندازه شبکه مش‌بندی برای یک نمونه سالم کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ که مود A_0 موج لمب با فرکانس 206 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است

Table 2 Mesh independence analysis for an intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ in which the A_0 Lamb wave mode with the frequency of 175 kHz was propagated

اندازه المان‌ها (mm)	سرعت موج (m/s)
1	1256.6
0.8	1256.6
0.5	1270.32
0.3	1272.44
0.2	1272

به منظور صحت‌سنجی روش شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب ارائه‌شده در این مطالعه، مدهای A_0 و S_0 موج لمب در نمونه‌های کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ با فرکانس‌های 25، 50، 75، 100، 125، 150، 175، 200، 225 و 250 کیلوهرتز گسترش یافتند. همان‌طور که در جدول‌های 3، 4، 5 و 6 مشاهده می‌شود، سرعت موج به دست آمده از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود برای مدها و فرکانس‌های مختلف موج لمب با سرعت موج به دست آمده به کمک نرم‌افزار Dispersion Calculator برای مدهای A_0 و S_0 به ترتیب کمتر از 2.1 و 5.2 درصد اختلاف داشت. بنابراین صحت شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج لمب

جدول 7 سرعت مود A_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی $[0_4/90_4]_s$ سالم و با چگالی ترک‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود

Table 7 The A_0 Lamb wave mode velocity for the intact $[0_4/90_4]_s$ composite specimen and those with different crack densities calculated using the finite element simulation

سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج بدون ترک	فرکانس (kHz)
$0.15 \frac{1}{mm}$ (m/s)	$0.1 \frac{1}{mm}$ (m/s)	$0.05 \frac{1}{mm}$ (m/s)	(m/s)	
1197	1238	1247	1264	175

جدول 8 سرعت مود S_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی $[0_4/90_4]_s$ سالم و با چگالی ترک‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود

Table 8 The S_0 Lamb wave mode velocity for the intact $[0_4/90_4]_s$ composite specimen and those with different crack densities calculated using the finite element simulation

سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج چگالی ترک	سرعت موج بدون ترک	فرکانس (kHz)
$0.15 \frac{1}{mm}$ (m/s)	$0.1 \frac{1}{mm}$ (m/s)	$0.05 \frac{1}{mm}$ (m/s)	(m/s)	
3208	3231	3260	3346	175

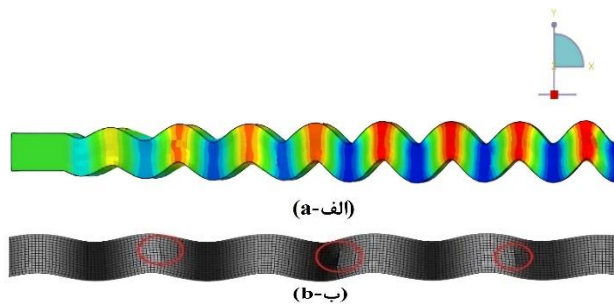


Fig. 12 (a) The propagation of the A_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz in the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.1 1/mm crack density and (b) the location of the matrix cracks induced in the specimen.

شکل 12 (الف) گسترش مود A_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ و (ب) محل ترک‌های زمینه ایجاد شده در نمونه.

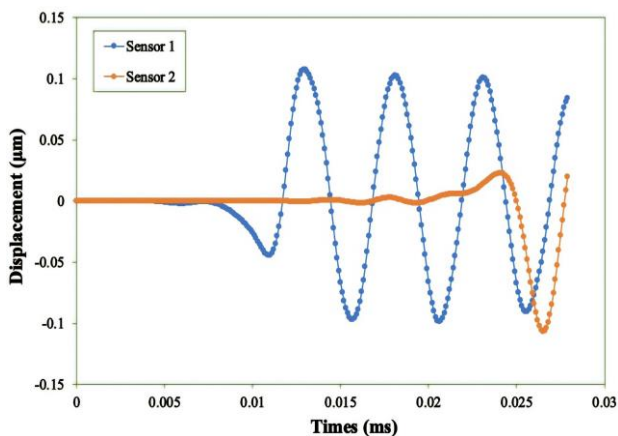


Fig. 13 The displacement-time diagram of sensors located on the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.1 1/mm crack density, in which the A_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz was propagated

جدول 5 سرعت مود A_0 موج لمب برای نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ محاسبه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار

Table 5 The A_0 Lamb wave velocity for the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ calculated from the finite element simulation and Dispersion Calculator software

فرکانس (kHz)	سرعت موج Dispersion Calculator (m/s)	سرعت موج شبیه‌سازی (m/s)	درصد اختلاف
25	665.39	664.33	0.15
50	878.105	881.119	0.34
75	1008.29	1011.48	0.31
100	1096.34	1095.57	0.07
125	1158.94	1165.5	0.56
150	1204.95	1206.29	0.11
175	1239.63	1223.77	1.27
200	1266.35	1261.26	0.4
225	1287.34	1270.26	1.32
250	1304.1	1301.3	0.21

جدول 6 سرعت مود S_0 موج لمب برای نمونه کامپوزیتی سالم با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ محاسبه‌شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار

Table 6 The S_0 Lamb wave velocity for the intact composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ calculated from the finite element simulation and Dispersion Calculator software

فرکانس (kHz)	سرعت موج Dispersion Calculator (m/s)	سرعت موج شبیه‌سازی (m/s)	درصد اختلاف
25	2953.82	2951	0.09
50	2948.14	2950	0.06
75	2938.4	2927.92	0.35
100	2924.17	2902.903	0.72
125	2904.77	2852.85	1.78
150	2879.12	2822.825	1.95
175	2845.51	2811.5	1.19
200	2801.22	2762.765	1.37
225	2741.68	2702.7	1.42
250	2658.95	-	-

جدول‌های 7 و 8 به ترتیب سرعت مودهای A_0 و S_0 موج لمب به دست آمده از طریق شبیه‌سازی اجزای محدود برای نمونه کامپوزیتی $[0_4/90_4]_s$ سالم و با چگالی ترک‌های مختلف در فرکانس تحریک 175 کیلوهرتز را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی ترک سرعت هر دو مود موج لمب به دلیل کاهش سفتی کل نمونه کاهش پیدا کرد. همان‌طور که در جدول‌های 7 و 8 مشاهده می‌شود سرعت موج لمب در چگالی ترک 0.05 در مود S_0 نسبت به مود A_0 کاهش بیشتری یافت که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر موج S_0 نسبت به ترک ماده زمینه است، هرچند که ایجاد موج متقارن S_0 در آزمایشگاه کمی سخت‌تر است. در شکل 12 گسترش مود A_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ نشان داده شده است. شکل 13 نیز سیگنال جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی این نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

شکل 15 نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ که مود S_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است

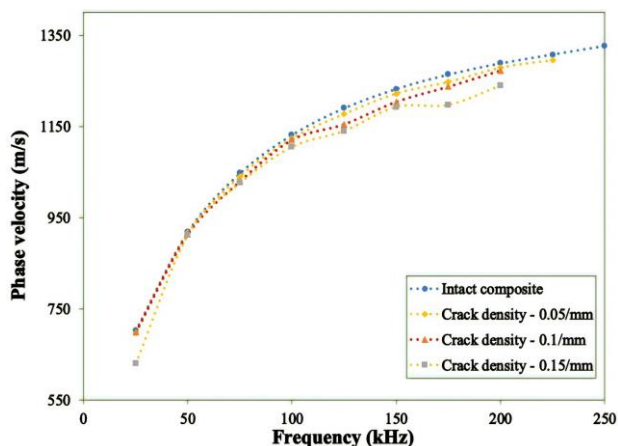


Fig. 16 The dispersion curve of the A_0 Lamb wave mode calculated for the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with different crack densities

شکل 16 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک‌های مختلف

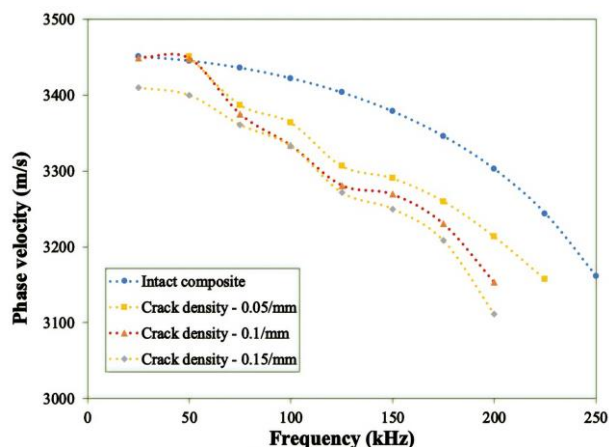
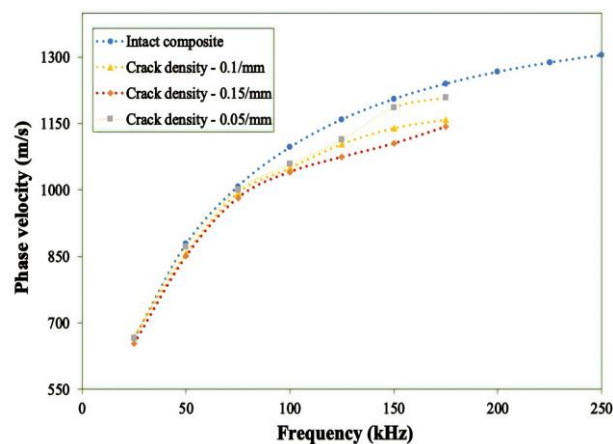


Fig. 17 The dispersion curve of the S_0 Lamb wave mode calculated for the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with different crack densities

شکل 17 نمودار پراکندگی مود S_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک‌های مختلف



شکل 13 نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ که مود A_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در آن گسترش یافته است

در شکل 14 گسترش مود S_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ نشان داده شده است. شکل 15 نیز سیگنال جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده روی این نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

در شکل‌های 16، 17، 18 و 19 نمودار سرعت فاز مدهای A_0 و S_0 موج لمب بر حسب فرکانس برای دو لایه‌چینی $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ با چگالی ترک‌های مختلف نمایش داده شده است. در این نمودارها مشاهده می‌شود که مود S_0 موج لمب به ترک زمینه حساسیت بیشتری دارد و افت سرعت بیشتری را در چگالی ترک‌های مختلف نسبت به مود A_0 نشان می‌دهد. همچنین مشاهده شد که با افزایش تعداد لایه‌های 90 درجه در لایه‌چینی $[0_2/90_6]_s$ نسبت به $[0_4/90_4]_s$ افت سرعت بیشتری در چگالی ترک‌های مختلف در هر دو مود A_0 و S_0 موج لمب اتفاق افتاد. این موضوع به دلیل افت سفتی بیشتر در نمونه کامپوزیتی دارای لایه‌های 90 درجه بیشتر در چگالی ترک‌های مختلف است.

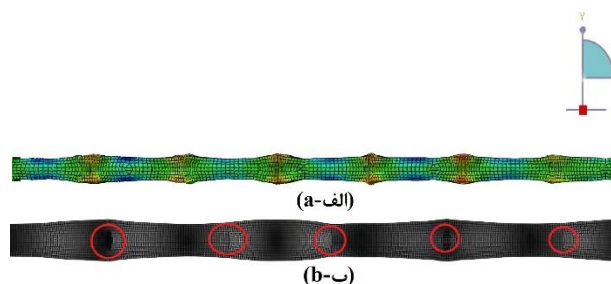


Fig. 14 (a) The propagation of the S_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz in the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.1 1/mm crack density and (b) the location of the matrix cracks induced in the specimen

شکل 14 (الف) گسترش مود S_0 موج لمب با فرکانس 200 کیلوهرتز در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک $0.1 \frac{1}{mm}$ و (ب) محل ترک‌های زمینه ایجاد شده در نمونه

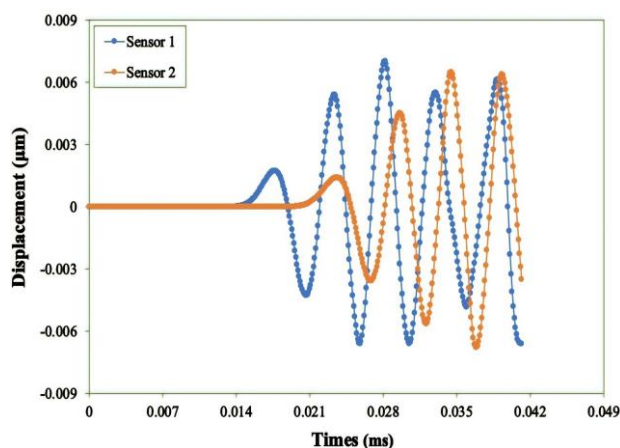


Fig. 15 The displacement-time diagram of sensors located on the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.1 1/mm crack density, in which the S_0 Lamb wave mode with the frequency of 200 kHz was propagated

امواج لمب در فرکانس‌های بالاتر به طور مؤثرتری انجام می‌شود چرا که افت سرعت در فرکانس‌های بالاتر، بیشتر خواهد بود. در نتیجه، شبیه‌سازی عددی المان محدود می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی دقیق و قابل اطمینان برای بررسی توانایی روش گسترش امواج لمب در ارزیابی غیر مخرب آسیب ترک زمینه در یک کامپوزیت متعامد با لایه چینی دلخواه مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به اینکه لایه چینی متعامد در صنعت استفاده زیادی دارند، شناسایی ترک زمینه امری مهم به شمار می‌آید. با این روش مدل‌سازی قبل از ارائه آزمایش می‌توان تا حدود زیادی متوجه رفتار کامپوزیت با ابعاد و لایه چینی دلخواه شد. در این مطالعه به دست آمد که در هر لایه چینی متعامد می‌توان به روش مدل‌سازی، قطعه ترک‌دار و سالم را از یکدیگر تمیز داد. همچنین مشخص شد که هرچه تعداد لایه 90 درجه بیشتر باشد و در این لایه‌ها ترک ایجاد گردد، تغییرات سرعت بیشتری ایجاد خواهد شد.

بر طبق نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر، موج لمب به ترک و چگالی ترک‌های متفاوت در لایه چینی متعامد حساسیت خوبی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه وجود ترک باعث کاهش سفتی معادل یک قطعه کامپوزیتی می‌شود، اثرات این کاهش سفتی به‌خوبی در هر دو مود A_0 و S_0 قابل مشاهده بودند. همچنین مشاهده شد با افزایش چگالی ترک و کاهش سفتی معادل کامپوزیت، فرکانس قطع کاهش بیشتری خواهد داشت. لذا این موضوع باید در آزمایش‌ها لحاظ گردد تا فرکانس آزمایش زیر فرکانس قطع باشد.

5- تقدیر و تشکر

این اثر تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته‌شده از طرح شماره 4005317 انجام شده است.

6- مراجع

- [1] Daniel, I. M. and Ishai, O., "Engineering Mechanics of Composite Materials" Oxford university press New York, Vol. 3, 1994.
- [2] Gayathri, P., Umesh, K. and Ganguli, R., "Effect of Matrix Cracking and Material Uncertainty on Composite Plates" Reliability Engineering & System Safety, Vol. 95, No. 7, pp. 716-728, 2010.
- [3] Abrate, S., "Matrix Cracking in Laminated Composites: A Review" Composites Engineering, Vol. 1, No. 6, pp. 337-353, 1991.
- [4] Hu, H. W., "Physical Aging in Long Term Creep of Polymeric Composite Laminates" Journal of Mechanics, Vol. 23, No. 3, pp. 245-252, 2007.
- [5] Fathi, H., Kazemirad, S. and Nasir, V., "Lamb Wave Propagation Method for Nondestructive Characterization of the Elastic Properties of Wood" Applied Acoustics, Vol. 171, pp. 107565, 2021.
- [6] Gorgin, R., Luo, Y. and Wu, Z., "Environmental and Operational Conditions Effects on Lamb Wave Based Structural Health Monitoring Systems: A Review" Ultrasonics, Vol. 105, pp. 106114, 2020.
- [7] Ebrahiminejad, A., Mardanshahi, A. and Kazemirad, S., "Nondestructive Evaluation of Coated Structures Using Lamb Wave Propagation" Applied Acoustics, Vol. 185, pp. 108378, 2022.
- [8] Riahi, M. and Ahmadi, A., "Utilization of Artificial Neural Networks for Detection and Classification of Damages in Composite Plate-Like Structures Via Ultrasonic Guided Waves" Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 343-352, 2018.
- [9] Mardanshahi, A., Shokrieh, M.M. and Kazemirad, S., "Identification of Matrix Cracking in Cross-Ply Laminated Composites Using Lamb Wave Propagation" Composite Structures, Vol. 235, pp. 111790, 2020.
- [10] Mardanshahi, A., Nasir, V., Kazemirad, S. and Shokrieh, M.M., "Detection and Classification of Matrix Cracking in Laminated

Fig. 18 The dispersion curve of the A_0 Lamb wave mode calculated for the composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ with different crack densities

شکل 18 نمودار پراکندگی مود A_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ و با چگالی ترک‌های مختلف

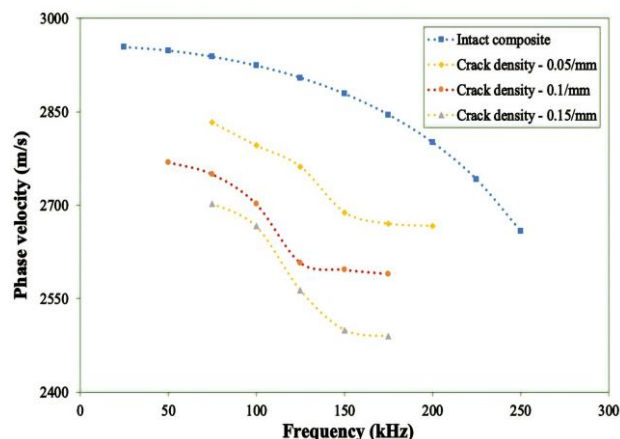


Fig. 19 The dispersion curve of the S_0 Lamb wave mode calculated for the composite specimen with the stacking sequence of $[0_2/90_6]_s$ with different crack densities

شکل 19 نمودار پراکندگی مود S_0 موج لمب محاسبه‌شده برای نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_2/90_6]_s$ و با چگالی ترک‌های مختلف

همان‌طور که در شکل‌های 16 الی 19 مشاهده می‌شود، در برخی از فرکانس‌ها سرعت موج لمب گزارش نشده است. این موضوع به این دلیل است که به علت وجود ترک زمینه در نمونه‌های شبیه‌سازی‌شده، فرکانس قطع کاهش یافته و کمتر از فرکانس تحریک اعمالی شده است. در این شرایط چندین مود مختلف موج لمب به‌طور هم‌زمان در نمونه کامپوزیتی گسترش می‌یابد و در نتیجه سرعت محاسبه‌شده از شبیه‌سازی، سرعت گروه می‌شود که متفاوت از سرعت فاز است. به عنوان مثال در شکل 20 مود A_0 موج لمب که در نمونه با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک 0.15 در فرکانس 250 کیلوهرتز تحریک شده نشان داده شده است اما مشاهده می‌شود که موج گسترش‌یافته موج خالص A_0 نیست و ترکیبی از مدهای مختلف است. ترکیب مدهای مختلف موج لمب باعث شد که یافتن موج خالص A_0 و S_0 دشوار شود و در نتیجه پیدا کردن سرعت فاز موج لمب از طریق محاسبه طول موج از روی شکل موج غیرممکن گردد.

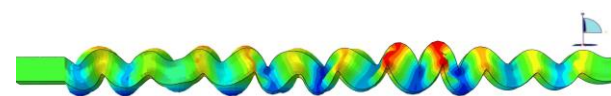


Fig. 20 The excitation of the A_0 Lamb wave mode at the frequency of 250 kHz in the composite specimen with the stacking sequence of $[0_4/90_4]_s$ with 0.15 1/mm crack density

شکل 20 تحریک مود A_0 موج لمب در نمونه کامپوزیتی با لایه چینی $[0_4/90_4]_s$ و با چگالی ترک 0.15 $\frac{1}{mm}$ در فرکانس 250 کیلوهرتز

4- جمع‌بندی

در تحقیق حاضر به کمک شبیه‌سازی المان محدود در دو لایه چینی شیشه/اپوکسی $[0_4/90_4]_s$ و $[0_2/90_6]_s$ اثر چگالی ترک‌های متفاوت بر سرعت مود A_0 و S_0 موج لمب در فرکانس‌های مختلف بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان دادند که سرعت فاز مود متقارن S_0 بهتر می‌تواند ترک‌های زمینه را تشخیص دهد هرچند که در واقعیت انتشار این امواج سخت‌تر از انتشار موج پادمقارن A_0 خواهد بود. همچنین، شناسایی ترک‌های زمینه از روش گسترش

- Composites Using Guided Wave Propagation and Artificial Neural Networks“ Composite Structures, Vol. 246, pp. 112403, 2020.
- [11] Ramezani, H., Kazemirad, S., Shokrieh, M.M. and Mardanshahi, A., “Effects of Adding Carbon Nanofibers on the Reduction of Matrix Cracking in Laminated Composites: Experimental and Analytical Approaches“ Polymer Testing, Vol. 94, pp. 106988, 2021.
- [12] Yilmaz, C., Topal, S., Ali, H. Q., Tabrizi, I. E., Al-Nadhari, A., Suleman, A. and Yildiz, M., “Non-Destructive Determination of the Stiffness Matrix of a Laminated Composite Structure with Lamb Wave“ Composite Structures, Vol. 237, pp. 111956, 2020.
- [13] Fattahi, A., Ramezani, H., Shokrieh, M.M. and Kazemirad, S., “Detection and Characterization of Matrix Cracking in Fiber - Metal Laminates Using Lamb Wave Propagation “ Structural Control and Health Monitoring, Vol. 29, No. 10, pp. e3039, 2022.
- [14] Mardanshahi, A., Shokrieh, M.M. and Kazemirad, S., “Simulated Lamb Wave Propagation Method for Nondestructive Monitoring of Matrix Cracking in Laminated Composites“ Structural Health Monitoring, Vol. 21, No. 2, pp. 695-709, 2021.
- [15] Parvari, Y., Kazemirad, S. and Ramezani, H., “Nondestructive Evaluation of Bilayer Metal-Composite Structures Using Finite Element Simulation of Guided Lamb Wave Propagation“ Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1700-1707, 2022.
- [16] Deng, P., Saito, O., Okabe, Y. and Soejima, H., “Simplified Modeling Method of Impact Damage for Numerical Simulation of Lamb Wave Propagation in Quasi-Isotropic Composite Structures“ Composite Structures, Vol. 243, pp. 112150, 2020.
- [17] Moser, F., Jacobs, L. J. and Qu, J., “Modeling Elastic Wave Propagation in Waveguides with the Finite Element Method“ NDT & E International, Vol. 32, No. 4, pp. 225-234, 1999.
- [18] Alleyne, D. N. and Cawley, P., “A Two-Dimensional Fourier Transform Method for the Measurement of Propagating Multimode Signals“ Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 89, pp. 1159-1168, 1991.



بررسی اثر فرآیند اصلاح سطحی ساچمه‌زنی و الکتروریسی پلی‌کاپرولاکتون بر خواص خوردگی بیوکامپوزیت Mg-2.5%HA

علی نگهبان خامنه¹، میلاد شمسی²، محمد صدیقی^{3*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

*تهران، صندوق پستی 16846-13114، Sedighi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/06/24

پذیرش: 1402/08/13

چکیده

بیوکامپوزیت‌های منیزیمی به دلیل خواص زیست‌سازگاری و زیست‌تجزیه‌پذیری به یکی از گزینه‌های بسیار مناسب در کاربردهای ایمپلنت‌های ارتوپدیک تبدیل شده‌اند. اما، نرخ خوردگی بالای منیزیم باعث تخریب سریع‌تر آن در محیط‌های خورنده می‌شود که این امر منجر به شکست زودهنگام ایمپلنت پیش از بهبود کافی استخوان می‌گردد. در همین راستا، نیاز است تا فرآیندهای اصلاح سطحی بر روی آن صورت گیرد تا مقاومت به خوردگی را بهبود بخشد. در این تحقیق، به بررسی تأثیر دو فرآیند اصلاح سطحی ساچمه‌زنی و الکتروریسی بر خواص خوردگی کامپوزیت منیزیم/هیدروکسی‌آپاتیت پرداخته شده است. فرآیند ساچمه‌زنی با استفاده از ساچمه‌های شیشه‌ای در شدت آلمن 0.3 mmN و با میزان پوشش 100 درصد بر روی کامپوزیت انجام شده است. فرآیند الکتروریسی نیز با استفاده از نانوالیاف از جنس پلی‌کاپرولاکتون (PCL) در ولتاژ 18 kV به مدت 30 دقیقه صورت گرفته است. آزمون‌های کشش- فشار روی نمونه کامپوزیت، پایش pH و کاهش وزن به روش غوطه‌وری روی نمونه‌های ساچمه‌زنی شده و پوشش‌دهی شده انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد الکتروریسی نرخ خوردگی منیزیم را در مدت زمان 1 روز و 7 روز به ترتیب به مقدار 75٪ و 40٪ کاهش داده است. ساچمه‌زنی نیز به همین ترتیب توانسته است نرخ خوردگی را به مقدار 35٪ و 20٪ کاهش دهد. الکتروریسی به دلیل سطح ویژه بالا جهت جذب کلسیم فسفات منجر به کاهش سطح تماس محلول خورنده شده و نرخ خوردگی را کاهش می‌دهد. ساچمه‌زنی نیز به دلیل تسریع در ایجاد لایه غیرفعال می‌تواند خوردگی را به تأخیر بیندازد و در کوتاه‌مدت منجر به افزایش مقاومت خوردگی شود.

کلید واژگان

بیوکامپوزیت منیزیمی،
اصلاح سطح،
پوشش‌دهی،
ساچمه‌زنی،
الکتروریسی

Investigating the effects of shot peening and Polycaprolactone (PCL) electrospinning surface treatments on the corrosion properties of Mg-2.5%HA biocomposite

Ali Negahban¹, Milad Shamsi¹, Mohammad Sedighi^{1*}

1-School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, Sedighi@iust.ac.ir

Keywords

Mg-based biocomposite,
Surface treatment,
Coating,
Shot peening,
Electrospinning

Abstract

Due to its biocompatibility and biodegradability, magnesium has become a very suitable candidate for orthopedic implant applications. However, its high corrosion rate leads to rapid deterioration in corrosive environments, resulting in premature failure of the implant before sufficient bone healing. In this regard, surface modifications are required to improve corrosion resistance. This research investigates the effect of two surface modifications, shot peening and electrospinning, on the corrosion properties of magnesium/hydroxyapatite composite. Shot peening was performed using glass beads at an Almen intensity of 0.3 mmN and with 100% coverage on the surface of the composite. Electrospinning was carried out using Polycaprolactone (PCL) nanofibers at 18 kV for 30 minutes. Tensile-compressive tests were performed on the composite specimens. Also, pH monitoring and weight loss tests were conducted on the shot peened and electrospun samples. The results show that electrospinning decreased the corrosion rate of magnesium by 75% and 40% after 1 day and 7 days of immersion, respectively. Shot peening also reduced the corrosion rate by 35% and 20%, respectively. Electrospinning reduced the corrosion rate by limiting the contact surface area between the corrosive solution and magnesium due to its high specific surface area for calcium-phosphate absorption. Shot peening, on the other hand, delayed the corrosion by accelerating the formation of a passive layer, leading to increased corrosion resistance in short periods.

Please cite this article using:

Negahban, A., Shamsi, M., Sedighi, M., "Investigating the effects of shot peening and Polycaprolactone (PCL) electrospinning surface treatments on the corrosion properties of Mg-2.5%HA biocomposite," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2266-2272, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2010600.1855>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1- مقدمه

ایمپلنت‌های زیست‌تجزیه‌پذیر با توجه به مزیت حذف جراحی ثانویه پس از بهبود بافت، در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران مختلف قرار گرفته‌اند. این ایمپلنت‌ها می‌توانند برای کاربردهای قلبی-عروقی و یا ارتوپدیک مورد توجه قرار گیرند. در کاربردهای ارتوپدیک که قابلیت تحمل بار مناسب از ماده مورد انتظار است، استحکام مناسب ایمپلنت علاوه بر زیست‌سازگاری اهمیت می‌یابد. ایمپلنت‌های پایه منیزیمی یکی از ایمپلنت‌های با پتانسیل بالا جهت این کاربردها معرفی شده‌اند. منیزیم یک فلز سبک با چگالی 1.734 g/cm^3 و مدول الاستیسیته 45 GPa می‌باشد [1] که در پوسته زمین و همینطور در دریا به وفور یافت می‌شود. این فلز با مدول الاستیسیته نزدیک خود به استخوان غشایی باعث کاهش اثر سپر تنش¹ می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد منیزیم می‌تواند در فرآیند استخوان‌زایی به عنوان محرک عمل نماید. همچنین، محصولات خوردگی آن مشکل‌ساز نبوده و می‌تواند توسط بدن جذب یا از آن دفع شود [2].

منیزیم خالص توانایی بالایی برای خوردگی دارد و به این دلیل به شکل آند فدا شونده کاربرد دارد [3]. این ماده بسیار حساس به میزان ناخالصی است و مقدار کم ناخالصی می‌تواند نرخ خوردگی آن را بسیار بالا ببرد. آلیاژسازی با عناصری همچون روی و کلسیم یا خالص‌سازی می‌تواند از مقدار تمایل این فلز به خوردگی بکاهد [4]. ضمناً، منیزیم خالص استحکام پایینی دارد و مناسب کاربردهای سازه‌ای نمی‌باشد. کامپوزیت‌های منیزیم با ذرات تقویت‌کننده سرامیکی همچون هیدروکسی‌آپاتیت با توجه به استحکام و زیست‌سازگاری مناسب توانسته‌اند جایگاه مناسبی در میان ایمپلنت‌های مورد تحقیق پیدا کنند [5]. هیدروکسی‌آپاتیت با ساختار $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ماده اصلی تشکیل‌دهنده استخوان می‌باشد [6]. محققان به بررسی فرآیندهای کامپوزیت‌سازی منیزیم با این ماده توسط روش متالورژی پودر یا ریخته‌گری هم‌زنی پرداخته‌اند و نتایج آن‌ها در موارد زیادی حاکی از ارتقاء خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی است [7].

فرآیندهای اصلاح سطح به منظور بهینه‌سازی خواص سطحی در مواد منیزیمی انجام می‌شود. در کاربردهای زیستی، اصلاح سطح می‌تواند به کنترل بیشتر انحلال یا محافظت باعث بهبود مقاومت به خوردگی آن شود. ضمناً، این اصلاحات سطحی می‌تواند باعث عملکرد تعاملی بهتر بین ایمپلنت و استخوان آسیب‌دیده شود. اصلاحات سطحی می‌تواند به شکل مکانیکی با اعمال بار و یا با افزودن ماده به عنوان پوشش صورت گیرد. فرآیند ساچمه‌زنی یکی از فرآیندهای متداول مکانیکی سطحی است که با ضربات ساچمه‌ها باعث تغییر میکروساختار و اعمال تنش پسماند فشاری در سطح می‌شود [8]. در اثر انرژی جنبشی بالای ساچمه‌ها، لایه تغییر شکل یافته پلاستیک روی سطح قطعه ایجاد می‌شود. لیو و همکاران [9] پس از ساچمه‌زنی آلیاژهای AZ31 و AZ91 توسط ساچمه‌های زیرکونیومی به قطر متوسط $400 \mu\text{m}$ به مدت 1 ساعت، متوجه افزایش مقاومت به خوردگی این دو آلیاژ در مدت زمان‌های غوطه‌وری پایین (24 ساعته) شدند. مطابق این تحقیق، ریزدانه شدن (تا ابعاد نانومتری) سطح منجر به پیدایش لایه غیرفعال و همینطور خوردگی میکرو-گالوانی میان دانه و مرز دانه را کاهش می‌دهد و در نتیجه مقاومت سطح به خوردگی افزایش می‌یابد. وو و همکاران [10] نیز پس از ساچمه‌زنی آلیاژ WE43 به مدت 15 دقیقه به نتایج مشابهی دست یافتند. به طوری که ساچمه‌زنی منجر به ریزدانه کردن سطح شده و در نتیجه چگالی

لایه غیرفعال هیدروکسید منیزیمی را افزایش داده است که در نتیجه نرخ خوردگی منیزیم در کوتاه‌مدت کاهش محسوسی یافته است. اما باقری فرد و همکاران [11] در تحقیقی متوجه شدند که در اثر افزایش چگالی آسیب در مرز دانه‌های سطح آلیاژ AZ31 پس از ساچمه‌زنی (ساچمه‌زنی شدید) و تجمع نایجایی‌ها و دوقلوبی‌ها، نرخ خوردگی گالوانی افزایش یافته و در نتیجه مقاومت به خوردگی آن کاهش یافته است.

فرآیندهای مختلفی برای پوشش‌دهی سرامیک، پلیمر و یا فلزات بر روی سطح منیزیم وجود دارد. الکتروروسی فرآیندی است که به طور عمومی برای ایجاد داربست‌های پلیمری با الیاف بافته نشده در کاربردهای دارورسانی و پانسمان‌بندی زخم کاربرد دارد [12]. این لایه داربستی می‌تواند روی سطح فلز پوشش‌دهی شود و باعث بهبود خواص شود. با توجه به نسبت سطح به حجم (سطح ویژه) بالای الیاف، این داربست می‌تواند سرعت جوانه‌زنی، رشد و تکثیر سلول‌های استخوانی و در نتیجه سرعت فرآیند بهبود شکستگی استخوان را افزایش دهد. در فرآیند الکتروروسی، محلول حاوی پلیمر به درون یک سرنگ سرتخت منتقل شده و در داخل یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا قرار می‌گیرد. در اثر میدان الکتریکی و نیروی فشاری ناشی از پمپ سرنگی، محلول از سرنگ خارج شده و حلال آن تبخیر می‌شود. در اثر کشیدگی زنجیره‌های پلیمری ناشی از میدان الکتریکی، نانوالیاف پلیمری بر روی سطح نمونه ایجاد می‌گردد. در کاربردهای زیستی منیزیم پس از انجام پیش اصلاح شیمیایی سطح، پوشش پلیمرهای زیست‌تجزیه‌پذیر به شکل الیاف مورد بررسی قرار گرفته است. ویسو و همکاران [13] یک آلیاژ اصلاح شده منیزیم با نانوالیاف پلی‌لاکتیک‌اسید² الکتروروسی شده ساختند. نتایج اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی نشان می‌دهد که پوشش از تصاعد هیدروژن جلوگیری می‌کند و در نتیجه باعث کاهش تمایل به انحلال در آلیاژ می‌شوند. رزک و همکاران [14] به معرفی پوشش الکتروروسی شده کامپوزیتی PCL/HA/Sim پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که پوشش مذکور خوردگی را به تأخیر می‌اندازد و سازگاری با استخوان را افزایش می‌دهد. بخششی‌راد و همکاران [15] لایه‌هایی از الیاف PCL/MgO-Ag را بر روی آلیاژ منیزیم نشاندهند. نتایج آن‌ها حاکی از مقاومت به خوردگی بیشتر در نمونه پوشش‌دهی شده نسبت به نمونه بدون پوشش و نمونه با پوشش Ta_2O_5 مگنترون اسپاتر شده است.

پلی‌کاپرولاکتون یک پلیمر زیست‌تجزیه‌پذیر و زیست‌سازگار است که به دلیل پایداری شیمیایی و خواص مکانیکی مناسب، به شکل‌های متفاوتی در کاربردهای پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است. PCL به دلیل قابلیت انحلال خوب، سازگار با فرآیندهای ترکیبی و امکان ترکیب آن با دیگر پلیمرها، یکی از گزینه‌های خوب برای الکتروروسی در کاربردهای پزشکی محسوب می‌شود [16]. در این مقاله، کامپوزیت منیزیم با تقویت‌کننده 5.2٪ هیدروکسی‌آپاتیت به روش ریخته‌گری هم‌زنی³ ساخته شده است. جهت کنترل نرخ خوردگی زیرلایه، اصلاح مکانیکی سطح توسط ساچمه‌زنی و نیز پوشش‌دهی الیاف PCL صورت گرفته است. در ادامه توسط آزمون خوردگی غوطه‌وری در محیط شبیه‌ساز SBF به ارزیابی اثر این فرآیندها پرداخته شده است.

² Poly-lactic acid (PLA)

³ Stir casting

¹ Stress-shielding

2- مواد و روش‌ها

1-2- مواد

منیزیم خالص به صورت شمش تهیه شده و ترکیب شیمیایی آن (Mg, 0.059% Al, 0.021% Si, 0.02% Mn, 0.015% Zn, 0.013% Fe) پودر هیدروکسی‌آپاتیت به شکل طبیعی از استخوان ران گاو فراوری شده است. در این فرآیند از کوره با دمای 200 °C به مدت یک روز و 900 °C به مدت 2 ساعت جهت حذف قسمت‌های غیرمعدنی استخوان استفاده شده و از فرآیند کوبش داخل هاون و آسیاب برقی جهت ساخت پودر بهره‌گیری شده است. ساچمه‌ها با ترکیب (78% SiO₂, 17% B₂O₃, 5% Al₂O₃) با اندازه میانگین 400 μm جهت استفاده به عنوان ساچمه‌های فرآیند ساچمه‌زنی از شرکت Leach-China خریداری شده است. شکل 1 تصویری از ساچمه‌های شیشه‌ای مورد استفاده در این فرآیند را نشان می‌دهد. گرانول‌های PCL با وزن مولکولی 80 KDa به عنوان ماده اولیه فرآیند پوشش‌دهی الکتروریسی از شرکت Sigma-UK تهیه شده است. سایر مواد شیمیایی با خلوص آزمایشگاهی و تولید شرکت Merck-Germany استفاده شده‌اند.

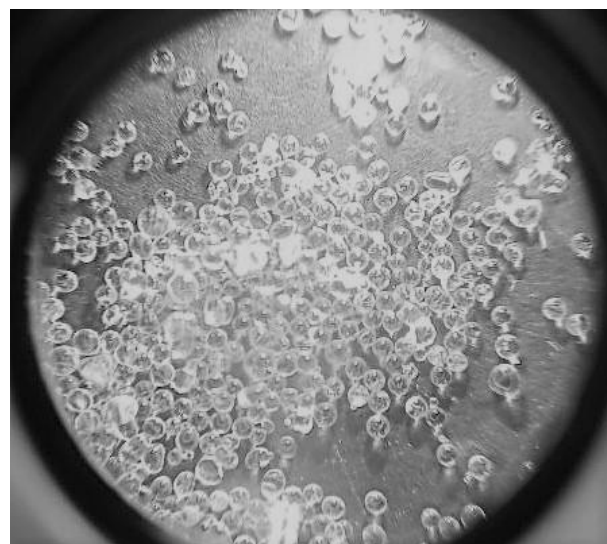


Fig. 1 Glass-beads used for shot peening

شکل 1 ساچمه‌های شیشه‌ای مورد استفاده در فرآیند ساچمه‌زنی

2-2- ساخت زیرلایه کامپوزیتی

از ریخته‌گری هم‌زنی برای تولید کامپوزیت با زمینه منیزیم خالص و ذرات تقویت‌کننده هیدروکسی‌آپاتیت استفاده شده است. درصد وزنی مورد استفاده برای فاز تقویت‌کننده با توجه به پژوهش‌های قبلی صورت گرفته 2.5٪ در نظر گرفته شده است [17], [18]. برای این فرآیند تکه‌های مناسب شمش منیزیم سوراخ‌کاری و پودر داخل آن جاگذاری شده است. ریخته‌گری داخل بوته فولاد ضدزنگ و تحت گاز آرگون با خلوص 99.9995٪ صورت گرفته است. از هم‌زنی مکانیکی در حالت مذاب توسط پره فولاد ضدزنگ و سپس هم‌زنی الکترومغناطیسی تا دمای انجام برای توزیع HA داخل ماتریس منیزیمی استفاده شده است. خنک‌کاری کامپوزیت پس از رسیدن به دمای انجماد در هوا صورت گرفته است. به منظور حذف عیوب غیر قابل پرهیز ایجاد شده در نمونه ریخته‌گری و افزایش خواص مکانیکی دو مرحله اکستروژن با نسبت‌های 5:1 و 4:1 به ترتیب بر روی نمونه در دمای 350 °C انجام شده است. به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه ساخته شده، آزمون کشش و فشار بر اساس استاندارد ASTM-E8 [19] و ASTM-E9 [20] در

حالت شبه استاتیکی توسط دستگاه SANTAM STM-50 انجام شده است. آزمون‌های مذکور به منظور افزایش دقت، سه بار تکرار و نتایج میانگین گزارش شده است.

3-2- پوشش‌دهی

میله‌های کامپوزیتی اکستروژن شده، پس از ماشینکاری و برش‌زنی به شکل قرص با ابعاد (ارتفاع) 3mm×(قطر) 9mm در آمده است. برای حذف اثر ماشینکاری از سطوح، ابتدا نمونه‌ها تا سمباده 2000 پولیشکاری شده و سپس در حمام التراسونیک توسط اتانول به مدت 10 دقیقه شسته شده و در نهایت خشک شده‌اند. برای بهبود اتصال پوشش‌دهی ابتدا فرآیند اسیدکاری سطح با نیتریک اسید 1 مولار به مدت 40 ثانیه انجام شده است. برای پوشش دهی با نانوالیاف PCL توسط فرآیند الکتروریسی ابتدا محلول مخصوص آن تهیه شده است. در این خصوص استیک‌اسید و فرمیک‌اسید با نسبت حجمی 3 به 1 مورد استفاده قرار گرفته است. پس از ساخت این ترکیب محلول و همگن‌سازی آن توسط هم‌زنی به مدت 10 دقیقه، گرانول PCL (12٪ وزنی) به محلول اضافه شده و به مدت 5 ساعت هم‌زنی مغناطیسی شده است. محلول فوق به درون یک سرنگ با حجم 3 میلی‌متر انتقال یافته و الکتروریسی توسط دستگاه پمپ سرنگی (سفیر ثریا سپاهان) با سرعت پیشروی 0.012 mL/min و ولتاژ 18 kV روی سطح قرص‌های خوردگی انجام شده است. فاصله سرنگ از سطح قطعه برابر با 10 cm بوده و فرآیند پوشش‌دهی به مدت 30 دقیقه به طول انجامیده است. شکل 2 فرآیند الکتروریسی بر روی قرص‌های خوردگی را نشان می‌دهد.

4-2- ساچمه‌زنی

فرآیند ساچمه‌زنی توسط یک دستگاه آزمایشگاهی صورت گرفته است. این فرآیند توسط ساچمه‌های شیشه‌ای و در شدت آلمن 0.3 mmN و با میزان پوشش 100 درصد بر روی قرص‌های خوردگی صورت گرفته است. با توجه به این‌که ساچمه‌زنی تمام سطوح قرص‌های خوردگی مورد نیاز می‌باشد، لذا قبل از برش‌دادن قطعات، سطح میله‌های اکستروژن‌شده ساچمه‌زنی شده است. سپس بعد از برشکاری و پولیش‌زنی، سطوح باقیمانده نیز مورد ساچمه‌زنی قرار گرفته است. لازم به ذکر است، میله‌های اکستروژن‌شده توسط یک الکتروموتور با سرعت 1 دور بر ثانیه به چرخش در آمده و ساچمه‌زنی شده‌اند. شکل 3 تصویری از سطح قرص منیزیمی ساچمه‌زنی شده (الف-ا) را در مقایسه با قرص قبل از ساچمه‌زنی (ب-ب) نشان می‌دهد. شکل 4 نیز تصویری از دستگاه ساچمه‌زنی را نشان می‌دهد.



Fig. 2 The process of electrospinning on the corrosion samples

شکل 2 تصویری از فرآیند الکتروریسی بر روی قرص‌های خوردگی

جدول 1 ترکیب شیمیایی مایع SBF بر اساس فرمول کوکوبو و همکارش [21]

Table 1 Chemical composition of SBF according to Kokubo et al.

ماده	مقدار (گرم)	خلوص (%)
NaCl	8.035	99.5
NahCO ₃	0.355	99.5
KCl	0.225	99.5
K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	0.231	99.0
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.311	98.0
1.0m-HCL	39 mL	-
CaCl ₂	0.292	95.0
Na ₂ SO ₄	0.072	99.0
Tris	6.118	99.0
1.0m-HCL	0-5 mL	-

$$CR = \frac{8.76 \times 10^4 W}{AT\rho} \quad (1)$$

در این رابطه W بیانگر کاهش وزن بر حسب گرم، A سطح مقطع نمونه به cm^2 ، T مدت زمان غوطه‌وری به ساعت و ρ چگالی نمونه‌هاست که مقدار 1.74 g/cm^3 برای منیزیم می‌باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- خواص مکانیکی زیرلایه

بررسی خواص مکانیکی زیرلایه با استفاده از دو آزمون کشش و فشار تک‌محوره می‌تواند تأثیر کامپوزیت‌سازی را در بهبود خواص منیزیم به طور واضح بیان کند. شکل 5 نمودارهای تنش-کرنش مهندسی در دو آزمون کشش (الف-ا) و فشار (ب-ب) تک‌محوره را نشان می‌دهد. جدول 2 نیز مقادیر استحکام تسلیم و نهایی کششی-فشاری به همراه کرنش شکست را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، افزودن ذرات تقویت‌کننده HA منجر به افزایش استحکام نهایی منیزیم می‌شود. علاوه بر آن، حد تسلیم کامپوزیت منیزیم در دو حالت فشاری و کششی به طور قابل‌توجهی افزایش پیدا کرده است. با بررسی نمودارهای استخراج شده مشخص می‌شود که کامپوزیت‌سازی با وجود افزایش حد نهایی و حد تسلیم منجر به کاهش کرنش شکست شده است. این پدیده بیشتر به دلیل تردشدگی² ماتریس در اثر افزودن سرامیک HA با طبیعت ترد است [22]. علاوه بر آن، در اثر انباشت پودرهای تقویت‌کننده³ کرنش شکست قطعات کاهش می‌یابد [23]. با وجود اینکه اکستروژن کامپوزیت منیزیم با نسبت 20 به 1 می‌تواند به طور قابل‌توجهی عیوب غیرقابل‌پرهیز فرآیند ریخته‌گری را کاهش دهد، کرنش شکست پایین‌تر کامپوزیت نسبت به منیزیم خالص می‌تواند به دلیل وجود تراکم پودر تقویت‌کننده باشد.

جدول 2 استحکام تسلیم و نهایی کششی/ فشاری و کرنش شکست کامپوزیت و منیزیم خالص

Table 2 Tensile/compressive yield and ultimate strength and fracture strain of Mg composite and pure Mg

ماده	S _Y [MPa]	S _U [MPa]	ε _f
کامپوزیت	180	244	0.101
خالص	88	205.83	0.169
درصد تغییرات	+104.5%	+18.54%	-40%
کامپوزیت	140	370.4	0.218
خالص	43.62	300	0.226
درصد تغییرات	+221%	+23.4%	-3.5%

² Brittleness

³ Agglomeration

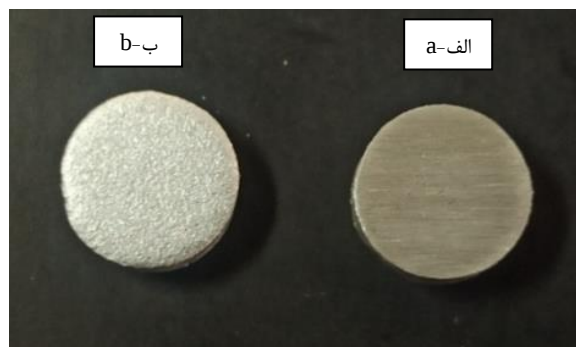


Fig. 3 The surface of samples (a) before and (b) after shot peening

شکل 3 سطح قرص‌های خوردگی (الف) قبل و (ب) بعد از ساچمه‌زنی

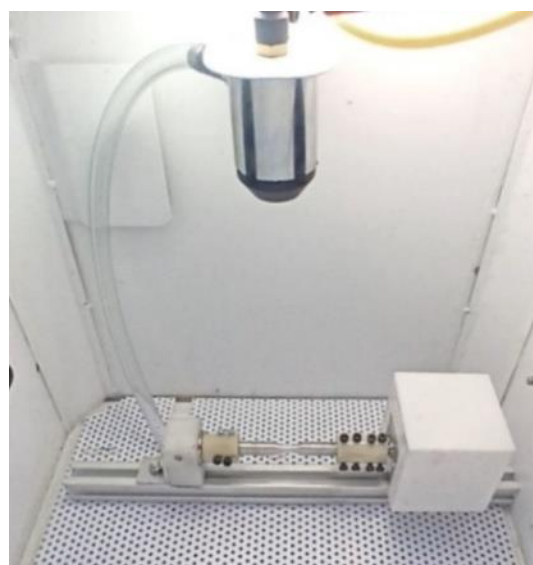


Fig. 4 Image of laboratory shot peening machine

شکل 4 تصویری از دستگاه ساچمه‌زنی ساخته شده در آزمایشگاه

5-2- آزمون نرخ خوردگی و پایش pH

آزمون خوردگی در محلول شبیه‌سازی شده بدن¹ که ترکیب شیمیایی آن مطابق دستورالعمل کوکوبو و همکارش [21] در جدول 1 آمده، انجام شده است. میزان حجم محلول خورنده به نسبت سطح کل نمونه‌های خوردگی مقدار 0.25 mL/mm^2 بوده و برای تمام نمونه‌ها این مقدار رعایت شده است. آزمون‌های خوردگی غوطه‌وری در دمای 37°C انجام شده و میزان pH محلول‌های خورنده به طور مرتب اندازه‌گیری شده است. با توجه به این که تغییرات pH محلول خورنده در ساعات ابتدایی خوردگی، با سرعت بیشتری تغییر می‌کند، لذا پایش pH در ساعت ابتدایی خوردگی، با فاصله 30 دقیقه صورت گرفته و سپس به یک ساعت و در نهایت هر سه روز یک‌بار پایش انجام شده است. در نهایت غوطه‌وری قرص‌های منیزیمی در SBF به مدت 7 روز صورت گرفته است. پس از حذف محصولات خوردگی با محلول شوینده کرومیک اسید و نیترات نقره ($200 \text{ g/L CrO}_3 + 10 \text{ g/L AgNO}_3$) و با اندازه‌گیری اختلاف وزنی نمونه‌ها نسبت به حالت قبل از غوطه‌وری در مدت 1 و 7 روز، نرخ خوردگی بر اساس کاهش وزن نمونه‌ها مطابق رابطه 1 به دست آمده است [3].

¹ Simulated Body Fluid (SBF)

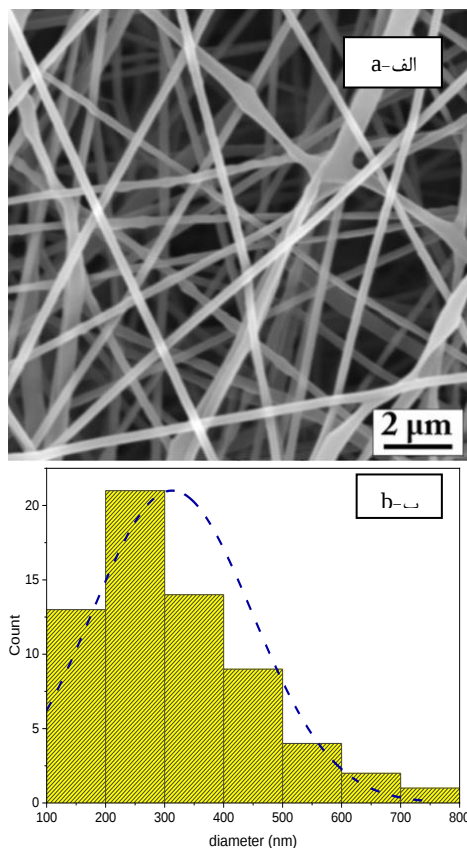


Fig. 6 (a) SEM image of nonwoven PCL coating made by electrospinning and (b) distribution plot of the fibre size

شکل 6 (الف) تصویر SEM از سطح قرص پوشش‌دهی شده با نانوالیاف PCL و (ب) نمودار توزیع اندازه الیاف

3-3- پایش pH و اندازه‌گیری نرخ خوردگی

با ثبت تغییرات pH محلول SBF در فواصل زمانی مختلف می‌توان به تأثیر فرآیندهای اصلاح سطحی در رفتار خوردگی کامپوزیت منیزیم پی برد. شکل 7 نمودار تغییر pH را برای کامپوزیت منیزیم، کامپوزیت ساچمه‌زنی شده و کامپوزیت پوشش‌دهی شده نشان می‌دهد. الکتروریسی توانسته به طور قابل‌توجهی مقاومت خوردگی منیزیم را افزایش دهد به طوری‌که در مدت 7 روز، pH محلول حاوی قرص‌های خوردگی منیزیم را افزایش به مراتب کمتری را تجربه کرده است. این موضوع به کاهش تماس منیزیم با سطح خورنده باز می‌گردد. الکتروریسی سطح با نانوالیاف با توجه به سطح ویژه بالا منجر به افزایش رسوب محصولات کلسیم-فسفات می‌گردد که با وجود متخلخل بودن خود پوشش می‌تواند سطح تماس محلول با ماده را به طور قابل‌توجهی کم کند [27]. در نتیجه، خوردگی کمتری در این بازه رخ داده و یون OH^- کمتری آزاد شده است و لذا pH محیط خورنده در مقایسه با حالت بدون اصلاح سطحی، مقدار کمتری دارد.

ساچمه‌زنی منجر به کاهش pH محلول در مدت زمان‌های غوطه‌وری پایین (حداکثر تا 3 روز) شده است. از مهم‌ترین دلایل این پدیده افزایش سرعت غیرفعال‌سازی⁴ سطح و تشکیل لایه هیدروکسید منیزیم است که در برخی تحقیقات مشابه نیز به آن‌ها اشاره شده است [10]. ساچمه‌زنی منجر به ایجاد یک لایه تغییرشکل یافته پلاستیکی در سطح می‌شود که به دلیل اثر ضربه ساچمه‌ها دارای دانه‌بندی بسیار ریز (در ابعاد نانو) و در نتیجه

برای بررسی اثر اکستروژن در بهبود خواص مکانیکی منیزیم خالص نیز می‌توان به مقایسه نتایج این نمودار با گزارش‌های مراجع استاندارد پرداخت [24]. مطابق این استاندارد، حد تسلیم کششی و فشاری منیزیم اکستروژ شده به ترتیب 56-102 MPa و 34-55 MPa گزارش شده است. در صورتی‌که در این تحقیق، این مقادیر به ترتیب به 88 MPa و 180 MPa افزایش یافته است. اکستروژن در نسبت‌های بالا (مانند حالتی که در این تحقیق رخ داده است) منجر به کارسختی، ریزدانه کردن ساختار، افزایش چگالی نایبایی‌ها و کاهش عیوب ریخته‌گری می‌شود که توانسته خواص مکانیکی منیزیم را بهبود قابل‌توجهی بخشد.

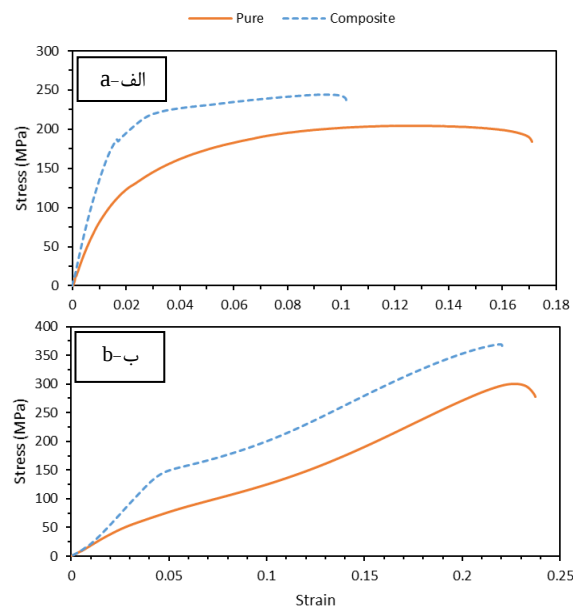


Fig. 5 Unidirectional stress-strain diagram of (a) tensile and (b) compressive tests for both pure and Mg composite

شکل 5 نمودار تنش-کرنش مهندسی (الف) آزمون کشش و (ب) فشار تک‌محوره برای منیزیم خالص و کامپوزیت منیزیم دو پاس اکستروژ شده

2-3- مشخصه‌یابی الیاف

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریخت‌شناسی¹ سطح قرص خوردگی پوشش‌دهی شده با نانوالیاف PCL در شکل 6 (الف-a) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، ساختار پوشش الکتروریسی متخلخل بوده و الیاف به صورت تصادفی و در جهات مختلف از پیش تعیین‌نشده‌ای قرار گرفته‌اند. به طوری‌که الیاف نسبتاً همگن بوده و قطر میانگین الیاف 312 ± 135 نانومتر برآورد شده است (مطابق شکل 6 (ب-b)). علاوه بر آن هیچ اثری از پدیده انباشت PCL به مانند دانه‌های تسبیح² در الیاف مشاهده نمی‌شود که خود نشانگر مناسب بودن مؤلفه‌های فرآیند الکتروریسی، رسانی و خواص مناسب محلول حاوی 12% PCL می‌باشد.

پوشش‌دهی سطح مواد پایه منیزیمی توسط نانوالیاف PCL به همراه اسیدکاری سطح پیش از عملیات³ منجر به بهبود زیست‌سلولی بافت‌های در معرض تماس شده [25] و علاوه بر بهبود اتصال آن‌ها با پوشش، خوردگی ایمپلنت را به تأخیر می‌اندازد [26]

¹ Morphology

² Beads

³ Pre-treatment

⁴ Passivation

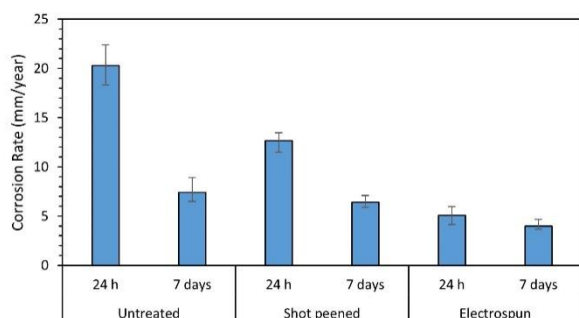


Fig. 8 Corrosion rates of untreated, shot peened and electrospun Mg composites over 24 hours and 7 days of immersion

شکل 8 نمودار میله‌ای از نرخ خوردگی کامپوزیت‌های منیزیمی بدون اصلاح سطحی، شات پین شده و پوشش‌دهی شده در مدت زمان‌های غوطه‌وری 24 ساعته و 7 روزه

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کامپوزیت منیزیمی با ذرات تقویت‌کننده هیدروکسی‌آپاتیتی ساخته شده و اثر فرآیندهای اصلاح سطحی ساچمه‌زنی و الکتروریسی بر رفتار خوردگی آن در محیط خورنده SBF مورد بررسی قرار گرفت. برای بهبود اتصال پوشش‌دهی الکتروریسی در ابتدا سطح نمونه‌ها اسید کاری شده و در نهایت پوشش‌دهی در مؤلفه‌های مناسب صورت گرفت به طوریکه الیاف ایجاد شده در ابعاد 312 ± 135 نانومتر بوده و به طور یکنواخت و تصادفی در سطح پخش شده بودند. فرآیند ساچمه‌زنی نیز با ساچمه‌های شیشه‌ای به قطر میانگین 400 میکرومتر در شدت آلن 0.3 mmN و با میزان پوشش 100٪ صورت گرفت. نتایج آزمون‌های خوردگی نشان دادند که:

- الکتروریسی سطح با نانوالیاف PCL توانست روند تغییر pH محلول را بسیار کندتر کند. به طوریکه بعد از 7 روز غوطه‌وری، pH محلول پوشش‌دهی شده به 7.8 رسیده در حالیکه کامپوزیت منیزیم بدون اصلاح سطحی در محدوده 9.5 بوده است.
 - ساچمه‌زنی توانست روند افزایش pH منیزیم را در ابتدا به تأخیر بیندازد اما بعد از گذشت حدوداً سه روز، تأثیر آن از بین رفته و روند افزایش pH به حالت بدون اصلاح سطحی نزدیک‌تر گشته است.
 - الکتروریسی با کاهش تماس سطح محلول خورنده و سطح ماده در اثر جذب محصولات کلسیم-فسفاتی می‌تواند از بروز خوردگی شدیدتر جلوگیری کند و نرخ خوردگی منیزیم را به مقدار 75٪ کاهش دهد.
 - ساچمه‌زنی نیز با تسریع ایجاد لایه غیرفعال شامل هیدروکسید منیزیم می‌تواند مقاومت خوردگی منیزیم را در کوتاه‌مدت بهبود بخشد اما در اثر حضور یون کلر و انباشت دوقلوبی‌ها در زیر سطح به دلیل اثر ضربه ساچمه‌ها، خوردگی پس از مدتی افزایش می‌یابد. با این وجود، ساچمه‌زنی نرخ خوردگی را به مقدار 35٪ کاهش داده است.
- در نهایت می‌توان نتیجه گرفت فرآیندهای اصلاح سطحی الکتروریسی و ساچمه‌زنی می‌توانند اثر بسیار مؤثری در رفتار خوردگی منیزیم داشته باشند و خوردگی مواد پایه منیزیمی را کاهش دهند.

5- مراجع

- [1] Lu, Y., Deshmukh, S., Jones, I. and Chiu, Y.-L., "Biodegradable Magnesium Alloys for Orthopaedic Applications," *Biomaterials Translational*, Vol. 2, p. 214, 2021.
- [2] Staiger, M.P., Pietak, A.M., Huadmai, J. and Dias, G., "Magnesium and Its Alloys as Orthopedic Biomaterials: A Review," *Biomaterials*, Vol. 27, pp. 1728–1734, 2006.

مرزداشته‌های بسیار کوچک و فراوان است. این پدیده می‌تواند خوردگی میکرو-گالوانی سطح را کاهش دهد [9]. اما با این حال ساچمه‌زنی منجر به افزایش زبری سطح شده و سطح تماس محلول با منیزیم را نیز افزایش می‌دهد. علاوه بر آن، لایه هیدروکسیدی منیزیم در حضور یون کلر که یکی از یون‌های مهم موجود در محلول SBF بوده و در بدن نیز حضور فعالی دارد، بسیار ضعیف بوده و خورده می‌شود. در نتیجه پس از بین رفتن لایه غیرفعال، روند خوردگی منیزیم ادامه می‌یابد. بر اساس تحقیقی که ملکی و همکاران [28] انجام داده‌اند، در اثر ساچمه‌زنی، دو لایه مختلف از نظر میکروساختار در ماده ایجاد می‌گردد. اولین لایه، لایه‌ای است که در آن اندازه دانه‌ها در اثر ضربه مستقیم ساچمه‌ها بسیار خرد شده و به محدوده نانومتری رسیده است. لایه دوم نیز در اثر تأثیر لایه اول دچار ریزش‌دگی دانه‌بندی شده است اما در برخی نقاط انرژی ساچمه‌ها کافی نبوده و باعث تجمع دوقلوبی‌ها شده است. افزایش چگالی دوقلوبی به دلیل سطح انرژی بالای خود، نرخ خوردگی را افزایش می‌دهد. لذا پس از خورده شدن لایه غیرفعال و عبور از لایه اول، محلول خورنده به لایه دوم می‌رسد که در اثر وجود دوقلوبی‌ها، مستعد خوردگی شدید است. لازم به ذکر است که دوقلوبی پدیده شایعی به هنگام تغییر شکل منیزیم در دمای محیط است [29]. این پدیده معمولاً به دلیل ساختار HCP^1 منیزیم و نداشتن صفحات فعال لغزش در دمای محیط به مقدار کافی، در بارهای شوکی و ضربه‌ای (مانند ساچمه‌زنی) رخ می‌دهد [30].

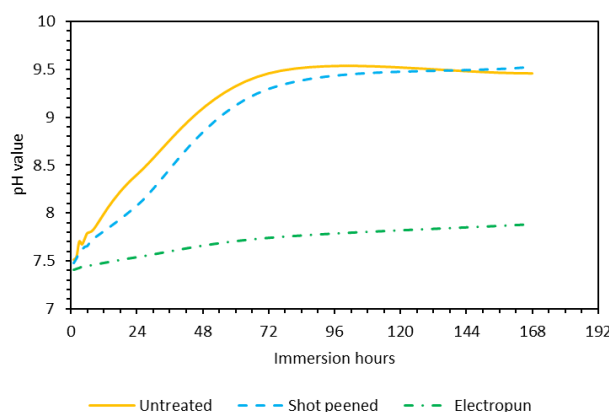


Fig. 7 pH-change diagram of untreated, shot peened and electrospun Mg composites

شکل 7 نمودار تغییرات pH محلول خورنده در عرض 7 روز برای کامپوزیت منیزیم بدون اصلاح سطحی، ساچمه‌زنی شده و پوشش‌دهی شده به روش الکتروریسی

با بررسی کاهش وزن قرص‌های خوردگی نیز می‌توان به نتایج مشابهی دست یافت. نرخ خوردگی کامپوزیت‌های منیزیمی بدون اصلاح سطح، ساچمه‌زنی شده و پوشش‌دهی شده که از رابطه 1 به دست آمده است در مدت زمان‌های غوطه‌وری 1 روزه و 7 روزه مطابق شکل 8 نشان داده شده است. مطابق این شکل، نرخ خوردگی کامپوزیت منیزیم بدون اصلاح سطحی در هر دو حالت بیشترین است. الکتروریسی منجر به کاهش نرخ خوردگی منیزیم به نسبت 75٪ در مدت 24 ساعت غوطه‌وری و 40٪ در مدت 7 روز غوطه‌وری شده است. ساچمه‌زنی نیز توانست نرخ خوردگی کامپوزیت منیزیم را به مقدار 35٪ در طی 24 ساعت غوطه‌وری و 20٪ در 7 روز غوطه‌وری کاهش دهد.

¹ Hexagonal Closed Packing

- [20] Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, Annual book of ASTM standards, 2001.
- [21] Kokubo, T. and Takadama, H., "Simulated Body Fluid (SBF) as a Standard Tool to Test the Bioactivity of Implants," Handbook of Biomineralization, John Wiley & Sons, Ltd, pp. 97–109, 2007.
- [22] Haghsheenas, M., "Mechanical Characteristics of Biodegradable Magnesium Matrix Composites: A Review," Journal of Magnesium and Alloys, Vol. 5, pp. 189–201, 2017.
- [23] Deng, K., Shi, J., Wang, C., Wang, X., Wu, Y., Nie, K. and Wu, K., "Microstructure and Strengthening Mechanism of Bimodal Size Particle Reinforced Magnesium Matrix Composite," Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 43, 1280–1284, 2012.
- [24] Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, ASM Metals Handbook, 1990.
- [25] Yari, A., Heidari, F., Moarrefzadeh, A. and Sarveazad, A., "Fabrication and Evaluation of Electrospun Polycaprolactone Nanoscaffold for Compatibility with Human Adipose Stem Cells for Tissue Engineering," In Persian, Journal of Cell Tissue, Vol. 13, pp. 167–176, 2022.
- [26] Hanas, T., Sampath Kumar, T.S., Perumal, G. and Doble, M., "Tailoring Degradation of AZ31 Alloy by Surface Pre-Treatment and Electrospun PCL Fibrous Coating," Materials Science and Engineering: C, Vol. 65, pp. 43–50, 2016.
- [27] Rivero, P.J., Redin, D.M. and Rodríguez, R.J., "Electrospinning: A Powerful Tool to Improve the Corrosion Resistance of Metallic Surfaces Using Nanofibrous Coatings," Metals (Basel), Vol. 10, 2020.
- [28] Maleki, E., Bagherifard, S., Heydari Astaraee, A., Sgarbazzini, S., Bandini, M. and Guagliano, M., "Application of Gradient Severe Shot Peening as a Novel Mechanical Surface Treatment on Fatigue Behavior of Additively Manufactured AlSi10Mg," Materials Science and Engineering A, Vol. 881, p. 145397, 2023.
- [29] Barnett, M.R., Stanford, N., Cizek, P., Beer, A., Xuebin, Z. and Keshavarz, Z., "Deformation Mechanisms in Mg Alloys and the Challenge of Extending Room-Temperature Plasticity," JOM, Vol. 61, pp. 19–24, 2009.
- [30] Callister, W.D. and Rethwisch, D.G., "Materials Science and Engineering: An Introduction," 10th ed., Wiley, Vol. 14, 2018.
- [3] Song, G.L. and Atrens, A., "Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys," Advanced Engineering Materials, Vol. 1, pp. 11–33, 1999.
- [4] Singh Raman, R.K., Jafari, S. and Harandi, S.E., "Corrosion Fatigue Fracture of Magnesium Alloys in Bioimplant Applications: A Review," Engineering Fracture Mechanics, Vol.137, pp. 97–108, 2015.
- [5] Witte, F., Feyerabend, F., Maier, P., Fischer, J., Störmer, M., Blawert, C., Dietzel, W. and Hort, N., "Biodegradable Magnesium-Hydroxyapatite Metal Matrix Composites," Biomaterials, Vol. 28, pp. 2163–2174, 2007.
- [6] Fathi, M.H., Hanifi, A. and Roohani Esfahani, S.I., "Synthesis, Characterization, and Comparative Bioactivity Evaluation of Nano Structured Hydroxyapatite," in Persian, Journal of Advanced Materials Engineering, Vol. 30, pp. 1–12, 2011.
- [7] Kuśnierczyk, K. and Basista, M., "Recent Advances in Research on Magnesium Alloys and Magnesium-Calcium Phosphate Composites as Biodegradable Implant Materials," Journal of Biomaterials Applications, Vol. 31, pp. 878–900, 2017 .
- [8] Joodaki, A. and Ashrafi, M.J., "Investigating the Effect of the Shot Peening Process on the Properties and Quality of Al-Al₂O₃ Composite Coating Created by Cold Spraying," in Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, pp. 2006–2010, 2023.
- [9] Liu, C., Zheng, H., Gu, X., Jiang, B. and Liang, J., "Effect of Severe Shot Peening on Corrosion Behavior of AZ31 and AZ91 Magnesium Alloys," Journal of Alloys and Compounds, Vol. 770, pp. 500–506, 2019.
- [10] Wu, S.X., Wang, S.R., Wang, G.Q., Yu, X.C., Liu, W.T., Chang, Z.Q.; Wen, D.S., "Microstructure, Mechanical and Corrosion Properties of Magnesium Alloy Bone Plate Treated by High-Energy Shot Peening," Translational Nonferrous Metals Society of China, Vol. 29, pp. 1641–1652, 2019.
- [11] Bagherifard, S., Hickey, D.J., Fintová, S., Pastorek, F., Fernandez-Pariente, I., Bandini, M., Webster, T.J. and Guagliano, M., "Effects of Nanofeatures Induced by Severe Shot Peening (SSP) on Mechanical, Corrosion and Cytocompatibility Properties of Magnesium Alloy AZ31," Acta Biomaterialia, Vol. 66, pp. 93–108, 2018.
- [12] Asadi Nasab, A., Najafi, M. and Zamani, F., "Application of Electrospun Nanofibers in Regenerative Dentistry," in Persian, Basparesh 2022.
- [13] Voicu, M.E., Demetrescu, I., Dorobantu, A., Enachescu, M., Buica, G.-O. and Ionita, D., "Interaction of Mg Alloy with PLA Electrospun Nanofibers Coating in Understanding Changes of Corrosion, Wettability, and PH," Nanomaterials, Vol. 12, p.1369, 2022.
- [14] Rezk, A.I., Mousa, H.M., Lee, J., Park, C.H. and Kim, C.S., "Composite PCL/HA/Simvastatin Electrospun Nanofiber Coating on Biodegradable Mg Alloy for Orthopedic Implant Application," Journal of Coatings Technology and Research, Vol. 16, pp. 477–489, 2019.
- [15] Bakhsheshi-Rad, H.R., Ismail, A.F., Aziz, M., Hadisi, Z., Omid, M. and Chen, X., "Antibacterial Activity and Corrosion Resistance of Ta₂O₅ Thin Film and Electrospun PCL/MgO-Ag Nanofiber Coatings on Biodegradable Mg Alloy Implants," Ceramics International, Vol. 45, pp. 11883–11892, 2019.
- [16] Suwantong, O., "Biomedical Applications of Electrospun Polycaprolactone Fiber Mats," Polymers Advanced Technology, Vol. 27, pp. 1264–1273, 2016.
- [17] Ghazizadeh, E., Jabbari, A.H. and Sedighi, M., "In Vitro Corrosion-Fatigue Behavior of Biodegradable Mg/HA Composite in Simulated Body Fluid," Journal of Magnesium and Alloys, Vol. 9, pp. 2169–2184, 2021.
- [18] Sabet, A.S., Jabbari, A.H. and Sedighi, M., "Microstructural Properties and Mechanical Behavior of Magnesium/Hydroxyapatite Biocomposite under Static and High Cycle Fatigue Loading," Journal of Composite Materials, Vol. 52, pp. 1711–1722, 2018.
- [19] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic materials at room temperature, Annual book of ASTM standard, 2001.



بررسی تجربی و عددی اثر شرایط محیطی دمایی بر استحکام کششی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی

جابر مسائلی¹، علی داور^{2*}، محسن حیدری بنی³، جعفر اسکندری جم⁴

1- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

4- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

* تهران، صندوق پستی 1774-15875، a_davar@mut.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله:
در این تحقیق با هدف بررسی اثر دما بر عملکرد اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی متصل شونده‌های کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی، اقدام به مطالعه پارامترهای تأثیرگذار بر این اتصال شده است. در همین راستا طراحی آزمایشی به روش تاگوچی در نرم‌افزار طراحی آزمایش مینی‌تب انجام پذیرفته است. هدف از انجام بخش تجربی این تحقیق، به دست آوردن اتصالات بهینه با توجه به پارامترها و سطوح تعریف شده جهت معیار قرار دادن و مقایسه با مقادیر بدست آمده پس از انجام آزمون بر روی اتصالات یاد شده تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد که به مدت چهار ساعت بر نمونه‌ها اعمال شده است، می‌باشد. به منظور نزدیک نمودن نتایج به شرایط صنعتی تعدادی نمونه اتصال چسبی، پرچی و ترکیبی با استفاده از سطوح بهینه پارامترهای تعریف شده برای هر یک از آن‌ها، براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ در راستای پهنای ناحیه اتصال نمودیم که نمونه‌های تعریف شده در این بخش با تکرارپذیری 2 نمونه تحت اثر دو دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفتند. از آنجایی که بررسی مبحث اتصالات به خصوص در اتصالاتی که متصل‌شونده‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها از جنس کامپوزیت‌ها می‌باشند، بسیار حائز اهمیت می‌باشد در این تحقیق اقدام به شبیه‌سازی عددی اتصالات ساخته شده در بخش تجربی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس نموده‌ایم. نتایج این تحقیق نشان داد که پس از اعمال شرایط محیطی دمایی بر نمونه‌های اتصال استاندارد بهینه در اتصال چسبی 27.61 درصد، اتصال پرچی 11.98 و اتصال ترکیبی 34.68 درصد کاهش استحکام را نسبت به نمونه‌های تحت اثر دمای محیط شاهد هستیم.	دریافت: 1402/07/22 پذیرش: 1402/08/29
کلیدواژگان کامپوزیت شیشه/اپوکسی، استحکام کششی، اتصال ترکیبی، اتصال چسبی، اتصال پرچی، شرایط محیطی دمایی	

Experimental and Numerical Study of the Effect of Environmental Conditions on the Tensile Strength of Adhesive, Riveted and Hybrid Joints of E-Glass/Epoxy Composites

Jaber Masayeli¹, Ali Davar^{1*}, Mohsen Heydari Beni¹, Jafar Eskandari Jam¹

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1774-15875, Tehran, Iran, a_davar@mut.ac.ir

Keywords

Glass/Epoxy Composite,
Tensile Strength,
Hybrid joints,
Adhesive Joints,
Riveted Joints,
Environmental Temperature
Conditions.

Abstract

Joints are considered as the weakest points in order to integrate the constituent members of a structure to transfer and bear the load. After checking the parameters, preparing the surface of the joint area using sandpaper on two levels using sandpaper with grain numbers of 220 and 400 and also controlling the thickness of the adhesive layer on two levels of 0.13 and 0.26 mm. The meter and the type of drill used to make holes on both surfaces were selected using a saw drill and a wood drill for rivet joint. The integration of selected parameters of two adhesive and riveted joints is considered in order to investigate the combined joint. In this regard, the experimental design using the Taguchi method has been carried out in the Minitab test design software. The purpose of conducting the experimental part of this research, as mentioned in the previous lines, is to obtain optimal joints according to the defined parameters and levels in order to set a standard and compare with the values obtained after performing the test on the mentioned joints under the effect of 80 degree Celsius applied to the samples for four hours. In order to bring the results closer to the industrial conditions, we connected a number of adhesives, riveted and combined samples using the optimal levels of parameters defined for each of them, based on the zigzag arrangement of four rivets along the width of the area, which are the samples defined in this section.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Masayeli, J., Davar, A., Heydari Beni, M., Eskandari Jam, J., "Experimental and Numerical Study of the Effect of Environmental Conditions on the Tensile Strength of Adhesive, Riveted and Hybrid Joints of E-Glass/Epoxy Composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2273-2296, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2012589.1862>

1- مقدمه

امروزه بررسی اتصالات و شرایط کارکرد آن‌ها بیش از گذشته مورد نیاز صنایع مختلف می‌باشد لذا پرداختن به این بخش از سازه‌ها موضوعی مناسب جهت تحقیق و پژوهش محققان می‌باشد. با پیشرفت صنایع و ساخت ماشین‌آلات چند جزئی و همچنین افزایش هزینه طراحی و ساخت آن‌ها، بشر بیش از پیش به فکر مطالعه دقیق آسیب‌های احتمالی وارده به اجزای این دستگاه‌ها به منظور جلوگیری از هدر رفتن هزینه و زمان صرف شده برای آن‌ها افتاد. یکی از بخش‌های آسیب‌پذیر، اتصالات این ماشین‌آلات می‌باشد. دادیان و همکاران [1] در سال 2019 بهیود استحکام اتصال لبه‌ای کامپوزیت-فولاد با درجه‌بندی ناحیه اتصال به وسیله الیاف کربن و شیشه و همچنین ایجاد درگیری مکانیکی به روش پله معکوس را موضوع پژوهش خود قرار دادند. با مطالعاتی که آن‌ها بر روی اتصالات لبه‌ای چسبی انجام دادند دریافتند که، شکست در اتصالات چسبی معمولاً در نتیجه توزیع غیریکنواخت تنش و کرنش است که با مقادیر بیشینه نزدیک به دو انتهای هم‌پوشانی مشاهده می‌شود. دادیان و همکاران در این تحقیق از الیاف کربن به عنوان المان تقویتی در لایه چسب استفاده کردند همچنین جهت بهیود توزیع تنش از درجه‌بندی خواص در طول هم‌پوشانی به صورت متقارن به وسیله الیاف کربن و شیشه بهره برده‌اند. این تحقیق در چند دامنه اتصالات چسبی را مورد بررسی قرار داده است از جمله، ایجاد روش جدید به منظور بررسی تأثیر وجود پله معکوس در اتصال چسبی، مدل‌سازی المان محدود برای بیان نحوه توزیع تنش برشی و پوست‌کنی در لایه چسب و همچنین تحلیل دلایل افزایش استحکام اتصال در نمونه‌های پله‌دار انجام پذیرفته است.

مورگادو¹ و همکاران [2] در سال 2019 مطالعه‌ای با هدف بررسی استحکام اتصالات CFRP به صورت تقویت شده با لایه‌های چسب را آغاز نمودند. آن‌ها با علم بر این موضوع که اثر لایه-لایه شدن کامپوزیت‌های متصل شده به یکدیگر پیش از تحمل بار نهایی شکست باعث شکست پیش از موعد اتصال یعنی قبل از ورود چسب به ناحیه گردنی شدن و تحمل حداکثر کرنش می‌شود سعی کردند تا روشی جهت از بین بردن این اتفاق در اتصالاتی با حضور CFRP ارائه دهند. در همین راستا، آن‌ها نقش حضور یک لایه چسب به عنوان تقویت‌کننده متصل‌شونده‌های کامپوزیتی را به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در طول تحقیقات چندین پیکربندی مختلف اتصال با چسب تقویت شده از جمله، اتصالات تقویت شده با لایه‌های چسب بین‌لایه‌ای و یک اتصال با لایه چسب سطحی توسعه یافت.

در سال 2019 فرناندز² و همکاران [3] اثر ضخامت و ناحیه هم‌پوشانی چسب بر روی اتصالات تک لبه کامپوزیت‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مطالعه خود را با بررسی تأثیر ضخامت چسب و طول ناحیه هم‌پوشانی چسبیده بر رفتار اتصالات تک لبه تحت بار کششی با استفاده از مدل المان محدود سه‌بعدی آغاز نمودند. در این تحقیق از مدل‌سازی یک ناحیه منسجم دوخطی برای نشان دادن رفتار چسب استفاده می‌شود و پارامترهای آن به عنوان تابعی از ضخامت چسب توسط آزمون‌های تیر دولبه و خمش نقاط انتهایی بدست آمده است. چسب مورد استفاده MTA-240 نام دارد. در این تحقیق برای محدوده ضخامت‌های چسب در نظر گرفته شده (0.13، 0.26، 0.39 و 0.52 میلی‌متر)، حداکثر تنش برشی و پوست‌کنی با افزایش ضخامت چسب کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش طول هم‌پوشانی افزایش می‌یابد. سونات و اوزرینچ⁴ [4] در سال 2020 تحقیقی با عنوان رفتار شکست اتصال

روسی ورقه‌های CFRP با پارچه‌های بافته شده به انجام رساندند. آن‌ها در این مطالعه بر روی تأثیر میزان زاویه اتصال روسی بر رفتار شکست سازه‌های کامپوزیتی بازیافت شده تمرکز نمودند. پانل کامپوزیتی ساخته شده براساس پیش‌آغشته‌سازهای کربن-اپوکسی ساخته شده و از رویه‌های آماده‌سازی و پخت استاندارد در آن پیروی شده است. آن‌ها اتصالات روسی با زاویه اتصال 1.9، 2.8 و 5.7 درجه را مورد ارزیابی تجربی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که استحکام کششی با افزایش زاویه اتصال روسی کاهش می‌یابد و همچنین شرایط و نحوه شکست برای هرکدام از زوایای اتصال روسی متفاوت بدست آمد به طوری که، در زاویه اتصال 5.7 درجه شکست در ناحیه الیاف اتفاق افتاد، در زاویه اتصال روسی 2.8 درجه ساختار لایه-لایه بدون آسیب قابل توجهی در ناحیه اتصال دچار شکست می‌شود.

جوزف ال هیج⁴ و همکاران [5] در سال 2020 تحقیقاتی بر روی اثر دمایی کوتاه مدت بر رفتار اتصالات دو لبه چسبی با متصل‌شونده کامپوزیتی را انجام رساندند. مجموعه اتصال شیشه اپوکسی دو لبه تحت بارگذاری برشی استاتیکی و سیکلی مورد ارزیابی قرار گرفت و مقاومت برشی استاتیکی و تعداد سیکل‌های نیرویی تا شکست به ترتیب اندازه‌گیری شده است. چسب مورد استفاده در این تحقیق چسب آرالدیت 2031 اپوکسی با دمای شیشه‌ای شدن 65 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی گذشت زمان و اعمال دما بر نمونه‌ها سه عملیات حرارتی بر روی آن‌ها به صورت، قرارگیری در دمای شیشه‌ای شدن و قرارگرفتن در معرض دمای 10 درجه سانتی‌گراد بیش از دمای شیشه‌ای شدن به مدت یک و دو هفته، که مجموعاً سه شرایط مختلف دمایی را برای اتصالات دو لبه چسبی مورد آزمایش در تحقیق فوق ایجاد می‌کند. بر همین اساس نتیجه‌گیری می‌شود که تا به حال تعداد کمی از مطالعات با توجه به مواد به کار برده شده و شرایط دمایی مورد بررسی طی مدت زمان مد نظر این تحقیق انجام پذیرفته است. از همین رو می‌توان این بار مبحث اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی را از نقطه‌نظر این تحقیق مورد بررسی و ارزیابی قرار داد.

دادیان و رهنما [6] در سال 2021 مطالعه‌ای تجربی و عددی به منظور درجه‌بندی عملکرد بهینه اتصالات چسبی برشی لبه‌ای آلومینیوم به GFRP با استفاده از اپوکسی CTBN را انجام رساندند. هدف اصلی آن‌ها از این تحقیق مطالعه عملکرد اتصالات درجه‌بندی شده با عملکرد بهینه (OFGJ) برای به حداکثر رساندن ظرفیت بارگذاری نهایی یک اتصال تک لبه برشی با متصل‌شونده‌های آلومینیوم T6-7075 و کامپوزیت شیشه-اپوکسی بوده است. همچنین این مطالعه قصد داشت با در نظر گرفتن یک استراتژی درجه‌بندی براساس مخلوط کردن یک رزین اپوکسی با مقادیر مختلف لاستیک مایع به منظور به دست آوردن تغییرات خواص به نتایج قابل توجهی دست یابد. آن‌ها ابتدا اتصالات چسبی تکی با خط اتصال یکنواخت و سپس نمونه‌هایی با ناحیه اتصال درجه‌بندی شده با نوارهای مساوی را مورد مطالعه قرار دادند همچنین از یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر انطباق با توزیع تنش برشی نرمال شده برای بدست آوردن بهترین خواص در امتداد خط اتصال استفاده نمودند. در مدل‌سازی عددی برای بدست آوردن توزیع تنش و شکست از مدل الاستیک-پلاستیک و مدل آسیب منسجم حالت مخلوط استفاده شد و به این ترتیب پیش‌بینی با درجه‌بندی متقارن ناحیه هم‌پوشانی، توزیع تنش یکنواخت‌تر شده‌ی بار شکست نسبت به نمونه پایه، 206 درصد افزایش می‌یابد. بهینه‌سازی خواص چسب با استفاده از توزیع تنش برشی نرمال شده اثرات

³ Sonat and Özerinç⁴ Joseph El Hage¹ Morgado² Fernández

یانگ^۳ و همکاران [10] برای ایجاد زبری سطح، فرناندز^۴ و همکاران [3] به منظور ایجاد ضخامت‌های مختلف استفاده شده است. انتخاب سطوح (2 سطح) از تحقیقات فوق با توجه به نزدیکی خواص چسب آکسون با چسب‌های مورد استفاده از نظر ویسکوزیته و زمان ژل شدن بالا، انتخاب شده است. در جدول 1 پارامترهای انتخاب شده جهت بررسی تأثیر آن‌ها بر روی اتصال چسبی و نیز سطوح آن‌ها، بدست آمده از دو تحقیق یاد شده بیان شده است. همچنین در جدول 2 تعداد آزمایش‌های بدست آمده از نرم‌افزار مینی‌تب^۵ که به روش تاگوچی طراحی شده، نشان داده شده است.

جدول 1 پارامترها و سطوح اتصال چسبی

Table 1 Parameters and levels of adhesive joint

ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنبلاده)	شماره سطوح
0.13	220	1
0.26	400	2

جدول 2 خروجی طراحی آزمایش مورد بررسی در اتصال چسبی

Table 2 The output of the test design examined in the adhesive joint

ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنبلاده)	شماره آزمون
1	1	1
2	1	2
1	2	3
2	2	4

از آنجایی که تحقیق حاضر با محدودیت‌هایی از نظر وسایل و امکانات و... مواجه بود، با توجه به پراکندگی مطالب قابل بررسی در هر کدام از اتصالات چسبی، پرچی و ناکافی بودن زمان انجام این پروژه بر اساس تحقیق خوران و همکاران [11] پارامتر نوع مته مورد استفاده در فرآیند سوراخ‌کاری، به عنوان پارامتر مؤثر در کیفیت نهایی اتصال پرچی، در دو سطح بر طبق جدول 3 با تکرارپذیری دو آزمون، مورد ارزیابی قرار گرفته است. اتصال ترکیبی (چسبی-پرچی) متشکل از پارامترهای تعیین شده برای هر کدام از اتصالات به صورت جداگانه، در دو سطح طی چهار مرحله آزمون طبق جدول 4 مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

جدول 3 سطوح و پارامترهای مورد بررسی در اتصال پرچی

Table 3 Levels and parameters investigated in rivet joint

نوع مته	شماره سطوح
مته اره	1
مته چوب	2

جدول 4 خروجی طراحی آزمایش اتصال ترکیبی

Table 4 Design output of hybrid joint test

نوع مته	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنبلاده)	شماره آزمون
1	1	1	1
2	2	1	2
2	1	2	3
1	2	2	4

مثبتی بر اصلاح توزیع تنش، حذف نیروهای غیربرشی، بهبود سهم تحمل بار، تغییر حالت شکست، و تأخیر در خرابی اتصالات چسب را دارد. بنابراین افزایش در مقاومت نیروی برشی بهینه نمونه درجه‌بندی شده به میزان قابل توجه 299 درصد به وجود می‌آید.

لی^۱ و همکاران [7] در سال 2020، اثر افزودن پین آن هم از جنس کامپوزیت بر اتصالات بین دو متصل‌شونده کامپوزیتی را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. اساس تحقیق آن‌ها بر مبنای آزمون‌های تجربی و عددی بر روی اتصالات تک لبه کامپوزیتی تقویت شده با پین‌های ساخته شده از الیاف یک‌طرفه تقویت شده از مواد کامپوزیتی پلاستیکی شکل گرفت. آزمون تعریف شده جهت سنجش استحکام این اتصالات، براساس نیروی کشش در یک جهت تعریف شده است، آن‌ها همچنین از پین‌های فلزی جهت مقایسه اتصالات در حضور این ماده با حالت پین کامپوزیتی استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که در اتصالات تک لبه ترکیبی، چسب با حضور پین کامپوزیتی به طور متوسط افزایش استحکام 19.1 درصدی را شاهد هستیم، در ضمن روشن شد که استفاده از پین فلزی با توجه به این نکته که باعث افزایش بار شکست اتصال می‌شود اما در نهایت مقاومت به خوردگی اتصال و نیز افزایش وزن اتصال را که در حدود 46.9 درصد می‌باشد افزایش می‌دهد. لی و همکاران [8] در سال 2020 مطالعه‌ای پارامتری در مورد خواص کششی اتصال ترکیبی چسب/پیچ و مهره را انجام دادند. متصل‌شونده‌های بکار برده شده از جنس CFRP و فولاد، پیچ و مهره استیل و چسب بکار برده شده از نوع SY14-M می‌باشند. آن‌ها ابتدا اتصالات خود را تحت آزمون کشش قرار دادند و سپس با استفاده از خواص مکانیکی هر یک از مواد بکار گرفته شده در اتصال ترکیبی اقدام به مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود نمودند که پس از انطباق نتایج تجربی و عددی به بررسی اثر پارامترهای دخیل در اتصال از جمله مونتاژ اتصال، هندسه اتصال و خواص مواد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مشخص شد افزایش مقدار تمامی پارامترهای طراحی اتصال باعث افزایش عملکرد کششی در استحکام، سفتی و انرژی جذب شده دارد به جز پیش‌گشتاور پیچ و مهره، نسبت طول قطعه آزاد S/D و مدول چسب در بردار. همچنین مشخص شد استفاده از چسب با استحکام بالا و مدول کم یک روش کلیدی برای بهبود آسیب اولیه نیرو و استحکام اتصال می‌باشد.

2- طراحی آزمایش

با توجه به پارامترهای تعیین شده برای هر یک از اتصالات طراحی آزمایش به شرح زیر انجام پذیرفته است. در تحقیق حاضر با توجه به محدودیت‌های هزینه‌ای چسب آکسون^۲ به عنوان متصل‌کننده انتخاب شده است. چسب فوق به دلیل دارا بودن دو خاصیت مهم ویسکوزیته بالا به منظور کنترل ضخامت و عمر مصرف و زمان ژل شدن بالا که در انجام مراحل ساخت اتصالات چسبی و ترکیبی لازم می‌باشند، انتخاب گردیده‌اند. بر همین اساس در کارهای گذشتگان به دنبال پارامترهای مؤثر در ایجاد یک اتصال چسبی مستحکم براساس همین مشخصه ذاتی چسب آکسون بوده‌ایم. برای ایجاد و ساخت یک اتصال چسبی مستحکم براساس کارهای انجام شده تا به امروز و همچنین محدودیت‌های مالی، دو پارامتر آماده‌سازی سطح ناحیه اتصال به وسیله کاغذ سنبلاده در دو سطح 220 و 400 و ضخامت لایه چسب در دو سطح به اندازه‌های 0.13 و 0.26 میلی‌متر بر طبق کارهای صفری و فراهانی [9] و

⁴ Fernandes

⁵ Minitab

¹ Li

² Axon

³ Yang

جدول 5 خواص مکانیکی رزین اپوکسی [12] LR520

Table 5 Mechanical properties of LR520 epoxy resin [12]

مدول الاستیک طولی (E1)	ضریب پواسون (ν 12)	استحکام نهایی (S1)
1300 (MPa)	0.2	62 (MPa)

در این تحقیق و همچنین با توجه به عرضه بازار، چسب پلیمری پایه اپوکسی آکسون H9940BK انتخاب گردید. چسب فوق ساخت شرکت سیکا آکسون بوده و از شرکت پیشرو مبتکر پیوند خریداری شده است.



Fig. 2 Sika-Axon H9940BK adhesive

شکل 2 چسب سیکا-آکسون H9940BK

5- پرچ آلومینیومی

پرچ‌ها در صنایع مختلف به منظور ایجاد اتصالات کاربرد فراوانی دارند. پرچ‌ها در اندازه‌ها و جنس‌های مختلفی در بازار موجود می‌باشند، که از جمله آن‌ها می‌توان به پرچ‌هایی با جنس آهن، آلومینیوم، استیل و... اشاره کرد. با توجه به این نکته که وزن تمام شده محصول نهایی در تمامی صنایع اعم از نظامی و غیرنظامی امری مهم تلقی می‌شود، ما برآن شدیم با توجه به این فاکتور مهم از پرچ‌هایی با جنس آلومینیوم استفاده نماییم. پرچ بکار گرفته شده در پژوهش حاضر از جنس آلومینیوم H38-5050 بوده و ساخت شرکت پرچ سازه می‌باشد (شکل 3).

در شکل 4 نمای شماتیک، جنس مواد به کار رفته و نیز پارامترهای ابعادی پرچ مورد استفاده در تحقیق حاضر مشخص می‌باشد. بر همین اساس به معرفی ابعاد هر یک از این پارامترها در این بخش می‌پردازیم. در جدول 6 ابعاد و اندازه‌های پارامترهای زیر بر اساس نیاز تحقیق در محصول شرکت سازنده پرچ جستجو شده است.



Fig. 3 Aluminum rivet

شکل 3 پرچ آلومینیومی

با توجه به پارامترهای مورد نیاز جهت انجام شبیه‌سازی اتصالات، آزمون‌های تعیین انرژی رهاش ترک در مود اول و دوم چسب و رزین و همچنین نمونه دامبل چسب به تعداد آزمون‌های یاد شده در بخش طراحی آزمون افزایش افزوده شده که مجموع آن‌ها را به عدد 66 آزمون می‌رساند.

3- مواد اولیه

به منظور ساخت نمونه‌های تحت آزمون بر اساس استانداردهای ASTM در پروژه حاضر، از مواد اولیه از جمله رزین اپوکسی، پارچه الیاف شیشه، چسب آکسون و پرچ آلومینیومی استفاده شده است؛ که به اختصار شرح داده خواهد شد.

4- الیاف

در این پژوهش با توجه به تعداد بالای نمونه‌های مورد آزمون، جهت صرفه‌جویی در هزینه‌ها از الیاف شیشه استفاده شده است. الیاف شیشه نسبت به دیگر الیاف از نظر هزینه تهیه مناسب، خواص برشی بالاتر و نیز مزیت‌های رادارگریزی مناسب‌تری دارند. در این پژوهش از پارچه الیاف شیشه 200 گرمی نوع E با زاویه الیاف 0 و 90 درجه جهت ساخت نمونه‌ها، محصول کشور چین که توسط شرکت پیشرو مبتکر پیوند PMP در بازار عرضه می‌شود، استفاده شده است.



Fig. 1 Glass fiber fabric

شکل 1 پارچه الیاف شیشه

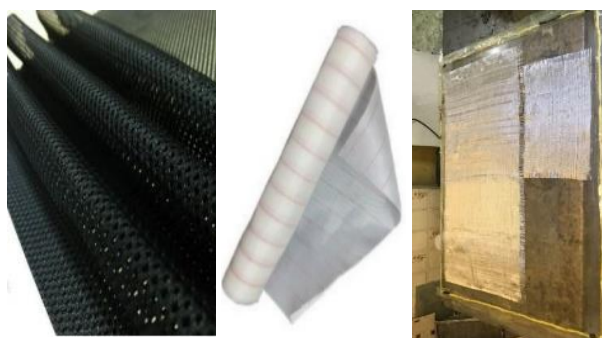
با توجه به دلایل بیان شده و همچنین موجودی بازار، رزین اپوکسی LR520 و عامل پخت HR520 از مجموعه پژوهشگاه پلیمر تهیه و در ساخت قطعات مورد استفاده قرار گرفت. محصول یاد شده قادر به پخت در معرض دمای محیط بوده و می‌توان آن را تا دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس پخت نمود. در این رزین از هیچ گونه حلال یا رقیق‌کننده غیر واکنش‌گرا استفاده نشده است. به همین دلیل است که محصول نهایی پس از تکمیل سیکل پخت هیچ گونه تغییرات وزنی یا حجمی را نشان نمی‌دهد. خصوصیات مکانیکی نسبتاً عالی رزین فوق آن را دارای قابلیت استفاده به عنوان لایه محافظتی محیطی، مناسب جهت بارگذاری‌های دینامیکی و استاتیکی نموده است. در جدول 5، خواص مکانیکی رزین LR520 بیان شده است.

جدول 6 مشخصات پرچ مورد نیاز تحقیق بر اساس اطلاعات شرکت سازنده.

Table 6 Rivet specifications required for research based on the manufacturer's company information

قطر پرچ (D)	طول پرچ (L)	ضخامت قطعه (S)	قطر سوراخ (F)	قطر سر پرچ (H)	ضخامت سر پرچ (E)	قطر میخ (W)
4.9 (میلی‌متر)	8 (میلی‌متر)	3-4.5 (میلی‌متر)	5 (میلی‌متر)	13 (میلی‌متر)	1.5 (میلی‌متر)	2.6 (میلی‌متر)

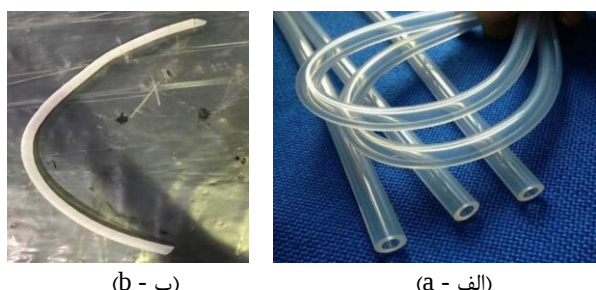
در مرحله بعد به سراغ برش پارچه‌های الیاف شیشه 0 و 90 درجه، داکرون، پارچه مش تزریق¹ و پلاستیک لازم جهت ایجاد محیط خلأ، طبق اندازه‌های مشخص شده می‌رویم. ابعاد در نظر گرفته شده برای ساخت صفحه‌ی شامل؛ نمونه‌های اتصالات، تعیین انرژی شکست مود اول² و دوم³ چسب و چندلایه کامپوزیتی 100×50 سانتی‌متر، نمونه‌های تعیین انرژی شکست در مود اول و دوم رزین 40×30 سانتی‌متر می‌باشد. در شکل 8 پارچه الیاف شیشه برش خورده در دو ابعاد ذکر شده، پارچه داکرون، پارچه مش 3 بعدی نشان داده شده است.



شکل 8 (الف) پارچه الیاف شیشه برش خورده در دو ابعاد ذکر شده، (ب) پارچه داکرون، (ج) پارچه مش تزریق

شکل 8 (الف) پارچه الیاف شیشه برش خورده در دو ابعاد ذکر شده، (ب) پارچه داکرون، (ج) پارچه مش تزریق

پارچه داکرون به عنوان لایه جداکننده بر روی آخرین لایه پارچه الیاف شیشه قرار داده می‌شود و از چسبیدن پارچه مش بر سطح کامپوزیت جلوگیری می‌کند. پارچه مش تزریق وظیفه انتقال یکنواخت رزین تزریق شده در داخل محیط خلأ بر روی پارچه‌های الیاف شیشه قرار داده شده بر روی سطح بر عهده دارد. از دیگر لوازم مورد استفاده در این روش ساخت، لوله مارپیچ و لوله پلاستیکی شفاف می‌باشد. وظیفه لوله پلاستیکی شفاف انتقال رزین از منبع به داخل محیط خلأ و خارج کردن رزین اضافی از درون محیط خلأ می‌باشد، همچنین وظیفه لوله مارپیچ تحویل گرفتن و انتقال دادن رزین در تمام طول سطح محیط خلأ می‌باشد. در شکل 9 (الف) لوله پلاستیکی شفاف، (ب) لوله مارپیچ استفاده شده در ساخت صفحات کامپوزیتی نشان داده شده است.



شکل 9 (الف) لوله پلاستیکی شفاف، (ب) لوله مارپیچ استفاده شده در ساخت صفحات کامپوزیتی

شکل 9 (الف) لوله پلاستیکی شفاف، (ب) لوله مارپیچ استفاده شده در ساخت صفحات کامپوزیتی

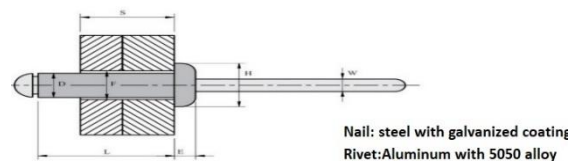


Fig. 4 Blind rivet schematic

شکل 4 شماتیک پرچ کور.

6- ساخت چندلایه کامپوزیتی

همانطور که در قسمت‌های قبلی شرح داده شد، روش مورد استفاده در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی این تحقیق، روش تزریق درون کیسه تحت خلأ می‌باشد. از همین رو به تشریح وسایل لازم جهت اجرای این روش و نیز شرح انجام این روش جهت ساخت نمونه‌ها پرداخته خواهد شد. اولین وسیله مورد نیاز جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی در این روش و اغلب روش‌های ساخت آن‌ها، قالب مناسب می‌باشد. جهت ساخت نمونه‌های مورد نیاز این تحقیق، از یک صفحه پلکسی مسطح طبق شکل 5 استفاده شده است.

این سطح صاف پس از پاک‌سازی به وسیله کارتک، توسط پارچه تنظیف آغشته به محلول استون طی سه مرحله با فاصله زمانی 20 دقیقه به خوبی تمیز می‌شود. پس از پاک‌سازی به وسیله نوار آب‌بند مساحت مورد نیاز از سطح صفحه پلکسی مشخص می‌شود. در شکل 6 (الف) صفحه پلکسی مرزبندی شده به وسیله نوار آب‌بند، (ب) نوار آب‌بند قابل مشاهده است.

پس از تعیین مرز سطح مورد استفاده از سطح قالب، سطح مذکور به وسیله واکس جداکننده به خوبی آغشته می‌شود. آغشته سازی سطح قالب در 3 مرحله با فاصله زمانی 40 دقیقه انجام پذیرفته است. در شکل 7 واکس جداکننده و سطح قالب واکس زده شده قابل مشاهده است.



Fig. 5 Cleaned plexiglass surface

شکل 5 سطح پاک‌سازی شده پلکسی

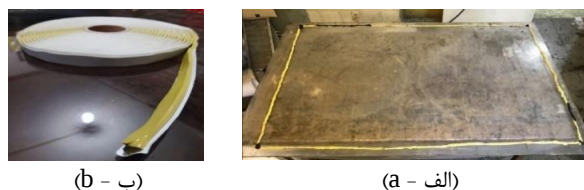


Fig. 6 (a) Plexiglas sheet bordered by sealing tape, (b) sealing tape

شکل 6 (الف) صفحه پلکسی مرزبندی شده به وسیله نوار آب‌بند، (ب) نوار آب‌بند.



Fig. 7 Separating wax and waxed mold surface

شکل 7 واکس جداکننده و سطح قالب واکس زده شده

³ ENF

¹ Mesh Infusion

² DCB

ذکر شده در دستورالعمل مورد پس پخت قرار می‌گیرند. صفحات ساخته شده به روش تزریق در خلأ پس از طی سیکل پخت رزین در دمای محیط به مدت 12 ساعت در دمای 60 درجه سانتی‌گراد درون اتوکلاو موجود در کارگاه کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر مورد پس پخت قرار گرفته‌اند. در شکل 13 (الف) صفحات کامپوزیتی پس از پخت در دمای محیط، (ب) صفحات کامپوزیتی درون اتوکلاو جهت انجام فرآیند پس پخت نشان داده شده است.

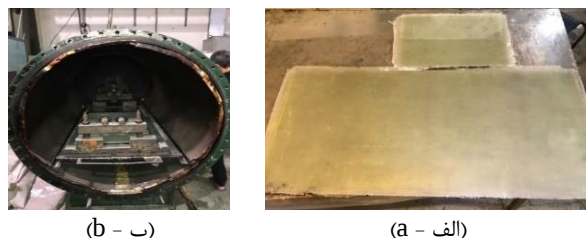


Fig. 13 (a) composite plates after baking at ambient temperature, (b) composite plates in the autoclave to perform the post-baking process.

شکل 13 (الف) صفحات کامپوزیتی پس از پخت در دمای محیط، (ب) صفحات کامپوزیتی درون اتوکلاو جهت انجام فرآیند پس پخت.

آزمون کشش براساس استاندارد ASTM D638 و با دستگاه کشش سنناتم STM-150 انجام گرفت. در شکل 14 نمونه دامبلی چسب در حال کشش قابل مشاهده می‌باشد.



Fig. 14 sample of adhesive dumbbells being stretched

شکل 14 نمونه دامبلی چسب در حال کشش

6- ساخت نمونه‌های اتصال چسبی

به منظور ساخت اتصال چسبی بر طبق پارامترهای تعریف شده برای این اتصال، یعنی آماده‌سازی سطح و ضخامت لایه چسب بر اساس شماره آزمون‌های استخراج شده از نرم‌افزار طراحی آزمایش به روش تاگوچی اقدام به تهیه لوازم مورد نیاز جهت انجام الزامات پارامترهای طرح شده است. سنباده 400، 220 که براساس تحقیق صفری و فراهانی [9]، یانگ² و همکاران [10] و همچنین قید و بند مورد نیاز جهت کنترل ضخامت‌های 0.13 و 0.26 میلی‌متر اتصالات چسبی، که ضخامت‌های ذکر شده براساس تحقیق فرناندز³ و همکاران [3] تعیین شده، تهیه شده است. در شکل 15 (الف) کاغذ سنباده 400 و 220 (ب) قید و بند کنترل ضخامت 0.13 و 0.26 میلی‌متر نشان داده شده است.

دستگاه پمپ خلأ¹ یکی از مهم‌ترین وسایل لازم جهت انجام این روش می‌باشد. در شکل 10 دستگاه پمپ خلأ قابل مشاهده است.



Fig. 10 Vacuum pump device.

شکل 10 دستگاه پمپ خلأ.

از آنجایی که کیفیت قطعات کامپوزیتی زمانی بیشترین میزان را دارد که قطعه نهایی عاری از هرگونه حباب هوا باشد، از طرف نشان داده شده در شکل 11 جهت هواگیری رزین آماده شده برای تزریق درون محیط خلأ استفاده شده است. این عمل به وسیله دستگاه پمپ خلأ با ایجاد فشار منفی انجام گرفته است.



Fig. 11 Container for aeration of prepared resin

شکل 11 ظرف جهت هواگیری رزین آماده شده

پس از حصول اطمینان بابت عدم نشت هوا به داخل محیط قالب و بوجود آمدن خلأ در داخل قالب، اقدام به تزریق رزین آماده‌سازی شده به درون قالب می‌کنیم. در شکل 12 رزین در حال جریان درون قالب تحت خلأ نشان داده شده است.

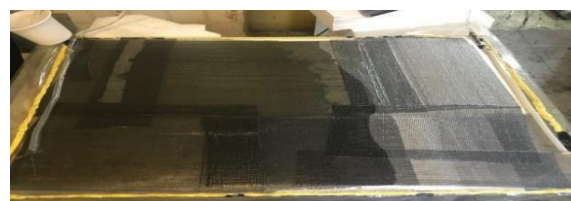


Fig. 12 Resin flowing into the mold under vacuum

شکل 12 رزین در حال جریان درون قالب تحت خلأ

جهت طی نمودن سیکل پخت رزین، پس از آغشته سازی تمام سطح قالب آن رایحه مدت 24 ساعت در حالت خلأ در دمای محیط قرار می‌دهیم. برای درک بهتر اثر شرایط محیطی بر روی تمامی نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق (چسب، کامپوزیت و.....) نمونه‌ها ابتدا با توجه به دستورالعمل شرکت سازنده آن درون دمای محیط پخت شده سپس در دما و به مدت زمان

³ Fernandes

¹ Vacuum pump

² Yang

400 به مدت 2 دقیقه در جهت تصادفی مورد سنباده‌زنی قرار بگیرند. مدت زمان و جهت سنباده‌زنی از تحقیق صفری و فراهانی [9] و یانگ¹ و همکاران [10] بدست آمده است. در شکل 17 دو نمونه اتصال به عنوان نماینده سطوح سنباده‌زنی شده به وسیله هر کدام از کاغذهای سنباده نشان داده شده است.



Fig. 17 Two joint samples representing the surfaces sanded by each of the sandpapers

شکل 17 دو نمونه اتصال به عنوان نماینده سطوح سنباده‌زنی شده به وسیله هر کدام از کاغذهای سنباده

با اتمام فرآیند سنباده‌زنی سطوح ناحیه اتصال، با استفاده از دستگاه زبری سنج موجود در کارگاه مواد فلزی دانشگاه صنعتی مالک اشتر پارامترهای قابل اندازه‌گیری ناهمواری سطوح اتصال را اندازه‌گیری می‌کنیم. در شکل 18، دستگاه زبری سنج و سطح استاندارد جهت کالیبره کردن دستگاه نشان داده شده است.



Fig. 18 Roughness meter and standard surface to calibrate the device
شکل 18 دستگاه زبری سنج و سطح استاندارد جهت کالیبره کردن دستگاه.

همانطور که در تصویر قبل مشخص است میزان اندازه پارامتر Ra محاسبه شده توسط دستگاه از سطح استاندارد، اختلافی در حدود 0.15 میکرومتر دارد که در تمامی نمونه‌های قرار گرفته در معرض دستگاه زبری سنج این مقدار اضافی باید کسر شود. به منظور اختلاف سنجی دقیق میان زبری سطوح سنباده کاری نشده و نمونه‌های سنباده کاری شده ابتدا نمونه سنباده کاری نشده در معرض دستگاه زبری سنج قرار داده شده است. در شکل 19، نمونه سنباده کاری نشده و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra نشان داده شده است.

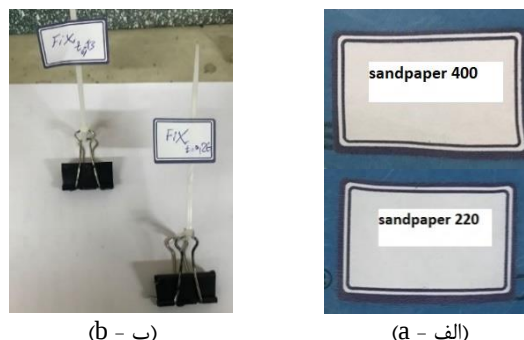


Fig. 15 (a) sandpaper 220 and 400 (b) control of thickness 0.13 and 0.26 mm

شکل 15 (الف) کاغذ سنباده 220 و 400 (ب) قید کنترل ضخامت 0.13 و 0.26 میلی‌متر

در جدول 7 نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های اتصال چسبی ساخته شده در این قسمت بیان شده است.

جدول 7 نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های اتصال چسبی

Table 7 Naming and specifications of adhesive joint samples

نام‌گذاری نمونه	تکرارپذیری	تحت اثر دمایی	آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنباده)	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)
S1111e	1	محیط	220	0.13
S1112e	1	محیط	220	0.26
S1121e	1	محیط	400	0.13
S1122e	1	محیط	400	0.26

پس از تأمین لوازم، ابتدا سطح ناحیه اتصال را بر طبق ابعاد استاندارد این ناحیه یعنی 25×25 میلی‌متر مشخص می‌کنیم (مطابق شکل 16). پس از مشخص نمودن سطح ناحیه اتصال نمونه‌ها، به سراغ پاک‌سازی اولیه سطح مذکور از آلودگی‌ها به وسیله پارچه نظیف آغشته به محلول استون طی سه مرحله با فاصله زمانی 20 دقیقه می‌رویم.



Fig. 16 Determining the surface of the joint area

شکل 16 مشخص نمودن سطح ناحیه اتصال

در مرحله بعد، عملیات آماده‌سازی سطح اتصال نمونه‌ها را انجام می‌دهیم. برطبق شماره آزمون‌های خروجی طراحی آزمایش دو عدد نمونه تحت آزمون باید توسط سنباده با شماره دانه 220 و دو نمونه دیگر با سنباده شماره دانه

¹ Yang

برطبق اطلاعات موجود در دستورالعمل شرکت سازنده چسب، رزین و سخت‌کننده به میزان 100 به 90 با یکدیگر به خوبی مخلوط می‌شوند. سپس بر روی هر دو سمت سطح ناحیه اتصال به میزان لازم آغشته می‌شوند و در نهایت برای بدست آمدن ضخامت مورد نیاز در سرتاسر ناحیه اتصال بین دو دهانه قید آماده‌سازی شده برای هر کدام از ضخامت‌های 0.13 و 0.26 میلی‌متر مطابق شکل 22 قرار می‌گیرند.



Fig. 21 The sample was sanded with a 400 sander and a roughness meter after measuring the Ra parameter

شکل 21 نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده 400 و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra

بر طبق اطلاعات درج شده در دستورالعمل شرکت سازنده چسب، برای آغاز سیکل پخت چسب ابتدا به مدت 24 ساعت در معرض دمایی محیط قرار می‌گیرد، سپس جهت پخت به مدت 16 ساعت در دمای 70 درجه سانتی-گراد درون آون موجود در کارگاه کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر طبق شکل 23 قرار داده شده است.



Fig. 22 Adhesive joint sample after applying adhesive and exposure to thickness control constraints

شکل 22 نمونه اتصال چسبی پس از اعمال چسب و قرارگیری در معرض قید کنترل ضخامت



Fig. 23 Placing adhesive joint samples to perform adhesive post-baking

شکل 23 قرار دادن نمونه‌های اتصال چسبی جهت انجام پخت چسب



Fig. 19 The unsanded sample and the roughness meter after measuring the Ra parameter

شکل 19 نمونه سنباده کاری نشده و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra

سپس نمونه سنباده کاری شده توسط کاغذ سنباده با شماره دانه 220 در معرض دستگاه زبری سنج قرار داده شده است. در شکل 20، نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده 220 و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra نشان داده شده است.

سومین و آخرین نمونه قرار گرفته در معرض دستگاه زبری سنج، نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده با شماره دانه 400 می‌باشد. در شکل 21 نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده 400 و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra نشان داده شده است.



Fig. 20 The sample was sanded with a 220 sander and a roughness meter after measuring the Ra parameter

شکل 20 نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده 220 و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra

پس از اندازه‌گیری ناهمواری سطح ناحیه اتصال، به سراغ ساخت چسب جهت ایجاد اتصال چسبی می‌رویم. برطبق توضیحات داده شده در بخش مواد اولیه، چسب مورد استفاده در این تحقیق آکسون H9940BK می‌باشد.

در شکل 26، نمونه محکم شده بر روی قالب سوراخ‌دار پس از انجام فرآیند سوراخ‌کاری نشان داده شده است.



Fig. 26 The sample fixed on the perforated mold after the drilling process

شکل 26 نمونه محکم شده بر روی قالب سوراخ‌دار پس از انجام فرآیند سوراخ‌کاری

همانطور که در تصویر مشخص می‌باشد نمونه و قالب سوراخ‌دار به وسیله کلمپ جهت جلوگیری از سرخوردن بر روی یکدیگر مهار شده‌اند. پس از طی شدن مرحله سوراخ‌کاری، نوبت به اعمال پرچ می‌رسد. پرچ آلومینیومی به قطر 5 میلی‌متر به وسیله دستگاه پرچ‌کن دو نمونه را جهت ایجاد یک اتصال پرچی به یکدیگر متصل می‌کند. در شکل 27 (الف) دستگاه پرچ‌کن به همراه پرچ آلومینیومی، (ب) اتصال پرچی قابل مشاهده است.

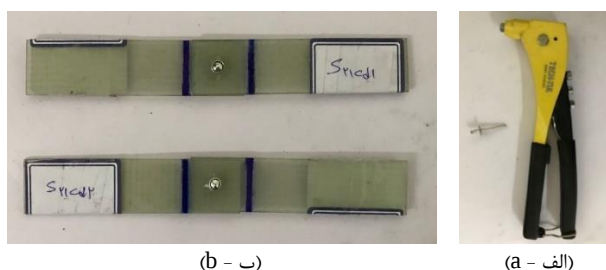


Fig. 27 (a) Riveting machine for aluminum rivets, (b) rivet joint
شکل 27 (الف) دستگاه پرچ‌کن به همراه پرچ آلومینیومی، (ب) اتصال پرچی

در جدول 8، نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های اتصال پرچی ساخته شده در این قسمت ارائه شده است.

جدول 8 نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های اتصال پرچی

Table 8 Naming and specification of rivet joint examples

نوع مته	تحت اثر دمای	تکرارپذیری	نام‌گذاری نمونه
اره	محیط	2	S21cd1
چوب	محیط	2	S21cd2

8- مدل‌سازی

در این پژوهش از روش المان محدود به عنوان یک روش عددی برای حل معادلات حاکم بر مسائل مرتبط با تحلیل سازه‌ای استفاده شده است. عموماً از تحلیل المان محدود برای اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی‌های ریاضی و تجربی استفاده می‌شود. مدل‌سازی اتصالات در نرم‌افزار مدل‌سازی عددی آباکوس³ 2021 انجام شده است.

³ Abaqus

7- ساخت نمونه‌های اتصال پرچی

ساخت اتصال پرچی را با مشخص کردن ناحیه سطح اتصال به مقدار استاندارد یعنی ابعاد 25×25 میلی‌متر و سپس پاک‌سازی اولیه سطح ناحیه اتصال به وسیله پارچه تنظیف آغشته به محلول استون طی سه مرحله با فاصله زمانی 20 دقیقه آغاز می‌نماییم. همانطور که در بخش‌های گذشته عنوان شد، به منظور ایجاد اتصال مکانیکی نیاز به سوراخ‌کاری قطعات می‌باشد. سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی از آن جهت حساس است که، این مواد ذاتی لایه-لایه دارند و باید در هنگام ایجاد سوراخ در آن‌ها دقت لازم را داشت. به منظور کنترل و جلوگیری از آسیب لایه-لایه شدن کامپوزیت‌ها باید سرعت دورانی مناسب ایجاد سوراخ، سرعت پیشروندگی مناسب و همچنین نوع و جنس مته بکار برده شده در انجام این فرآیند انتخاب شوند. به دلیل محدودیت در وسایل کنترل سرعت دورانی و سرعت پیشروندگی مته در قطعه کار، به منظور بررسی اتصال پرچی اثر نوع مته بکار برده شده در فرآیند سوراخ‌کاری به عنوان پارامتر انتخاب شده است. با توجه به موجودی بازار بر اساس تحقیق خوران و همکاران [11] مته اره¹ و مته چوب² به منظور بررسی انتخاب شدند. در شکل 24 (الف) مته چوب و (ب) مته اره قابل مشاهده هستند.

از آنجایی که در بررسی اتصال پرچی فقط یک پارامتر در دو سطح مورد بررسی قرار گرفته است، امکان طراحی آزمایش بدلیل ناکافی بودن تعداد پارامترها میسر نبوده و لذا تصمیم بر این شد که دو نمونه مورد آزمون با تکرارپذیری 2 عدد انجام شود. برای بالا بردن کیفیت اتصال و دقت سوراخ‌کاری نیاز به یک قالب از پیش سوراخ‌کاری شده است، به همین منظور ابتدا محل قرارگیری سوراخ را که براساس استاندارد در مرکز ناحیه اتصال قرار دارد به صورت نقشه درآورده، سپس جنس قالب تعیین شده و در نهایت با توجه به ابعاد و اندازه‌های استخراج شده اقدام به تولید قالب سوراخ‌دار می‌نماییم. ابعاد قالب همانند یک نمونه استاندارد اتصال تک لبه در نظر گرفته شده و در همان کارگاه برش CNC و اترجت ماشین‌کاری شده است. با توجه به اندازه قطر مته مقدار قطر سوراخ بر روی قالب برابر 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل 25 قالب پلکسی به ضخامت 10 میلی‌متر با سوراخ به قطر 5 میلی‌متر قابل مشاهده است.

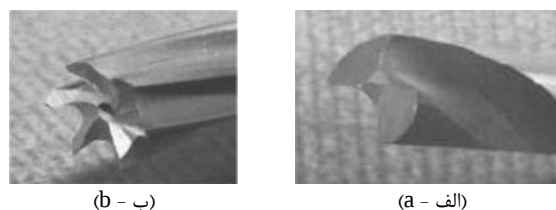


Fig. 24 (a) wood drill and (b) saw drill [8].

شکل 24 (الف) مته چوب و (ب) مته اره [11].



Fig. 25 10 mm thick plexiglass mold with a 5 mm diameter hole

شکل 25 قالب پلکسی به ضخامت 10 میلی‌متر با سوراخ به قطر 5 میلی‌متر

¹ Saw Drill

² Candle Stick Drill

9- مدل ناحیه چسبنده^۱

جدول 9 معیار دوبعدی هاشین [13].

معیار گسیختگی	مود گسیختگی
$Fft = (\sigma_{11} XT) 2 + 1 SL (\sigma_{212} + \sigma_{213}) \leq 1$	$\sigma_{11} \geq 0$
$F_{Ft} = \frac{\sigma_{11}}{-X_c} \leq 1$	$\sigma_{11} < 0$
$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22}^2}{Y_r}\right) + \left(\frac{\sigma_{22}^2}{Y_r}\right) \leq 1$	$\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$
$F_{mc} = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_c} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_l}\right)^2$	$\sigma_{22} < 0$
≤ 1	

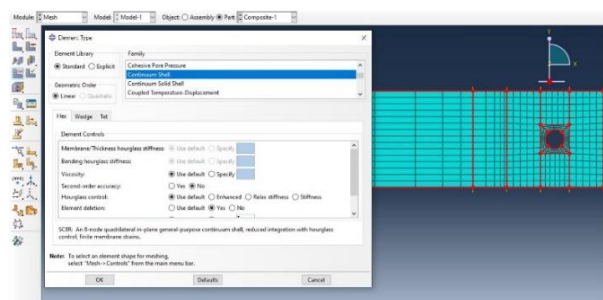
دانه‌بندی مدل شبیه‌سازی شده تک لایه‌های کامپوزیتی به صورت یک پوسته پیوسته چهارضلعی با 8 گره در صفحه، یکپارچگی کاهش یافته⁴ با کنترل باریک شوندگی⁵ و کرنش‌های غشایی محدود (SC8R) در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌های ایجاد شده برای تک لایه کامپوزیتی 1062 و برای 12 لایه برابر 12744 عدد المان یکدست آمده است که البته برای هر دو زیرآیند اتصال ترکیبی برابر 25488 عدد می‌باشد.

به منظور بررسی استحکام و روند تخریب چسب، در اتصال تک‌لبه چسبی و ترکیبی بین قطعات کامپوزیت شیشه/اپوکسی از مدل ناحیه چسبناک و قانون کشش-جدایش استفاده شده است. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی عددی و داده‌های بررسی شده در مقالات، تنش‌های وارد شده به چسب ترکیبی از برشی و پوست‌کنی است، از معیار شروع آسیب مربعات تنش اسمی رابطه 1 برای تعیین شروع استفاده شد:

$$\left\{ \frac{\langle \sigma_n \rangle}{T_n} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_s}{T_s} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_t}{T_t} \right\}^2 = 1 \quad (1)$$

در این رابطه σ_s ، σ_t و σ_n به ترتیب مؤلفه‌های تنش در راستای عمودی و برشی داخل صفحه و خارج صفحه و T_s ، T_t و T_n به ترتیب مؤلفه‌های تنشی بحرانی در راستای عمودی و برشی داخل و خارج صفحه هستند. علامت $< >$ کروشه بوده و به معنی عدم شروع آسیب در تنش فشاری است. طبق رابطه 1 هر سه مؤلفه‌ی تنش در شروع آسیب دخالت دارند. رشد آسیب با استفاده از انرژی شکست کنترل می‌شود و قسمت نزولی نمودار کشش جدایش به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. برای تحلیل مود ترکیبی رشد آسیب می‌توان از هر یک از دو معیار توانی و بنز-گان استفاده نمود همچنین به منظور کاهش داده‌ها بهتر است که از معیار BK استفاده شود.

در این تحقیق، به منظور بررسی شروع آسیب در چندلایه‌های کامپوزیتی و همچنین تقویت‌کننده‌ها، از معیار هاشین دوبعدی استفاده شده است [13]. این معیار برای کامپوزیت‌های تک‌جهته مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به حضور دو فاز متفاوت در کامپوزیت، آسیب به صورت مودهای مختلف روی می‌دهد. معیار هاشین، به علت سادگی پیاده‌سازی در مدل‌های المان محدود در صنعت کاربرد فراوانی دارد. جدول 9 معیار هاشین را برای حالت دوبعدی که در نرم‌افزار آباکوس بصورت پیش‌فرض وجود دارد نشان می‌دهد. در روابط



شکل 28 پنجره مربوط به مشخصات دانه‌بندی تک لایه کامپوزیتی اتصال کامپوزیتی

در این بخش به منظور تعیین تعداد امان مناسب از تحلیل الاستیک اتصال بهره گرفته شده است. در شکل 29 همگرایی تعداد دانه انتخاب گردیده است.

¹ Cohesive zone model² Hashin

3 Tie

امکان طراحی آزمایش برای آن فراهم نشد و لذا در این بخش به آن اشاره‌ای نشده است. در جدول 11، خروجی طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای اتصال ترکیبی براساس سه پارامتر ناهمواری سطح، ضخامت لایه چسب و نوع مته در دو سطح و نیز مؤلفه محاسبه شده پس از انجام آزمون استاندارد اتصال تک لبه (SLS) تحت دمای محیط به نمایش درآمده است.

جدول 11 خروجی طراحی آزمایش اتصال ترکیبی به روش تاگوچی

Table 11 The design output of the combination test of Taguchi method

شماره آزمون	آماده‌سازی سطح	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	نوع مته	Tt & Ts (MPa)
1	220	0.13	اره	12.763
2	220	0.26	چوب	10.269
3	400	0.13	چوب	13.013
4	400	0.26	اره	12.386

14- بررسی اثر پارامترها

به منظور بررسی اثر هر یک از پارامترهای مورد استفاده در استحکام بدست آمده از اتصالات چسبی و ترکیبی آزموده شده در این تحقیق از فاکتور واریانس استاندارد و اثر سیگنال به نویز با بهره‌گیری از حالت بیشترین مقدار بهترین، نمودارهایی در نرم‌افزار طراحی آزمایش مینی‌تب¹ ایجاد شده که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد. در شکل 30 و 31 به ترتیب نمودارهای مربوط به اثر پارامترهای تعریف شده اتصال چسبی و ترکیبی بر استحکام آن‌ها نشان داده شده است.

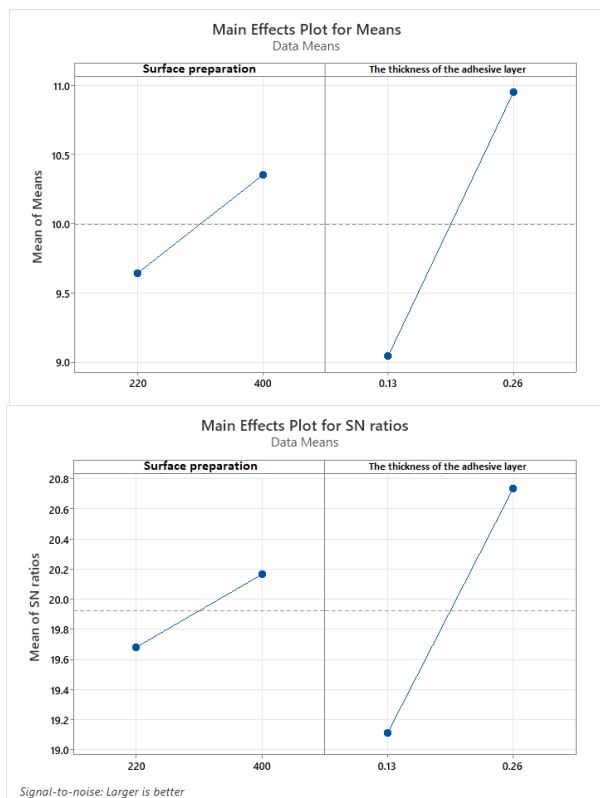


Fig. 30 Diagrams related to the effect of the defined parameters of the adhesive joint on its strength

شکل 30 نمودارهای مربوط به اثر پارامترهای تعریف شده اتصال چسبی بر استحکام آن

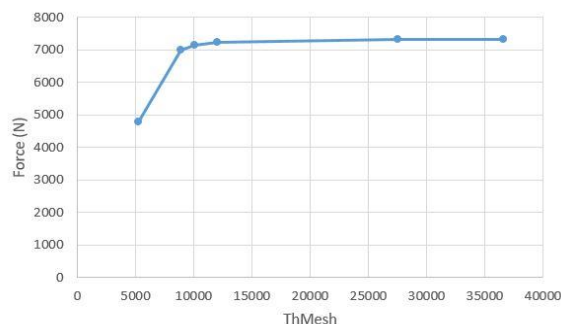


Fig. 29 Convergence of mesh number

شکل 29 همگرایی تعداد دانه

12- نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از خروجی آماری طراحی آزمایش، آزمون‌های تجربی خواص مواد شامل دامبلی چسب در دمای 80 درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت اثر دمای محیط و دمای 80 درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های اتصال چسبی، پرچی و ترکیبی ساخته شده براساس طراحی آزمایش تحت اثر دمای محیط، نمونه‌های اتصال چسبی، پرچی و ترکیبی بهینه تحت دمای 80 درجه سانتی‌گراد، اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی توسعه داده شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ به صورت افقی در ناحیه اتصال تحت اثر دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد، تعیین انرژی شکست در مود اول (DCB)، تعیین انرژی شکست در مود دوم (ENF)، مدل‌سازی عددی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی (چسبی-پرچی) تحت اثر دمای محیط و دمای 80 درجه با آرایش استاندارد و زیگزاگ، و در نهایت مقایسه نتایج آزمون‌های تجربی اتصالات با مدل‌های شبیه‌سازی شده متناظرشان در نرم‌افزار المان محدود آباکوس پرداخته شده است.

13- تحلیل و بررسی آزمون‌های طراحی شده به روش تاگوچی

یکی از مؤلفه‌های مهم در مبحث اتصالات، استحکام برشی آن‌ها می‌باشد که تا به اینجای کار پارامترهای مؤثر در ایجاد این مؤلفه برشمرده شد و کارهای انجام شده تاکنون حتی‌الامکان مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از روش تاگوچی به منظور طراحی آزمایش بهره برده شده است. در جدول 10، خروجی طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای اتصال چسبی بر اساس دو پارامتر آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنباده) و ضخامت لایه چسب در دو سطح و نیز مؤلفه محاسبه شده پس از انجام آزمون استاندارد اتصال تک لبه (SLS) تحت دمای محیط قابل مشاهده است.

جدول 10 خروجی طراحی آزمایش اتصال چسبی به روش تاگوچی

Table 10 The design output of Taguchi's adhesive bonding test

شماره آزمون	آماده‌سازی سطح	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	Tt & Ts (MPa)
1	220	0.13	9.542
2	220	0.26	9.739
3	400	0.13	8.544
4	400	0.26	12.158

همانطور که پیش از این اشاره شد، با توجه به محدودیت‌های موجود به منظور ایجاد اتصال پرچی تنها یک پارامتر در دو سطح در نظر گرفته شد که

¹ Minitab

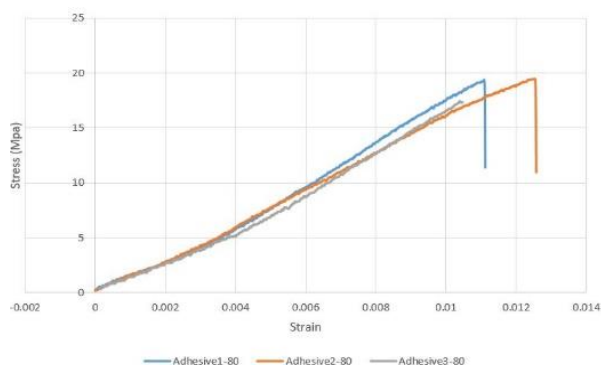


Fig. 32 Stress-strain diagram of adhesive under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 32 نمودار تنش- کرنش چسب تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد



Fig. 33 Dumbbell samples made to check the mechanical properties under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 33 نمونه‌های دامبلی ساخته شده جهت بررسی خواص مکانیکی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

نمونه‌های دامبلی چسب تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از تخریب در شکل 34 قابل مشاهده می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود، محل شکست در سه نمونه متفاوت می‌باشد. در نمونه شماره 2 محل ایجاد شکست نسبت به دو نمونه دیگر به محل ایده‌آل (مرکز نمونه) ایجاد شکست در نمونه‌ها، نزدیک‌تر می‌باشد. با مطالعه استاندارد مربوط به این آزمون و پژوهش‌های انجام گرفته در مواجهه با چنین شکست‌هایی در نمونه‌های تحت آزمایش، عملیاتی به منظور اصلاح مقادیر نیرو و جابجایی بدست آمده از آزمایش صورت گرفته بر روی این نمونه‌ها انجام می‌دهیم. ابتدا فاصله محل ایجاد شده از شکست نمونه‌ها تا نزدیک‌ترین لبه آن‌ها را اندازه می‌گیریم. سپس فاصله تا لبه بدست آمده نمونه شماره 2 را به عنوان مرجع بررسی اختلاف فاصله شکست از لبه نمونه‌ها قرار دادیم. از آنجایی که دو نمونه دیگر (1 و 3) محل شکست نامتعارفی دارند و سطح نیروی به نسبت کمتری از نمونه شماره 2 تحمل نموده‌اند لذا برای جلوگیری از ایجاد افت بیش از حد مقدار میانگین پارامترهای استخراج شده از این آزمون اقدام به اصلاح نیرو و جابجایی بدست آمده از آزمون بر روی دو نمونه 1 و 3 به روش بیان شده پرداختیم. برای این منظور اختلاف بدست آمده از فاصله محل شکست نمونه‌های 1 و 3 نسبت به نمونه 2 محاسبه می‌کنیم. میزان درصد انحراف نسبت به مقدار مرجع را محاسبه نموده و در مقادیر نیرو-جابجایی متناظر هریک از نمونه‌ها ضرب می‌نماییم و حاصل بدست آمده را با مقادیر پایه نیرو-

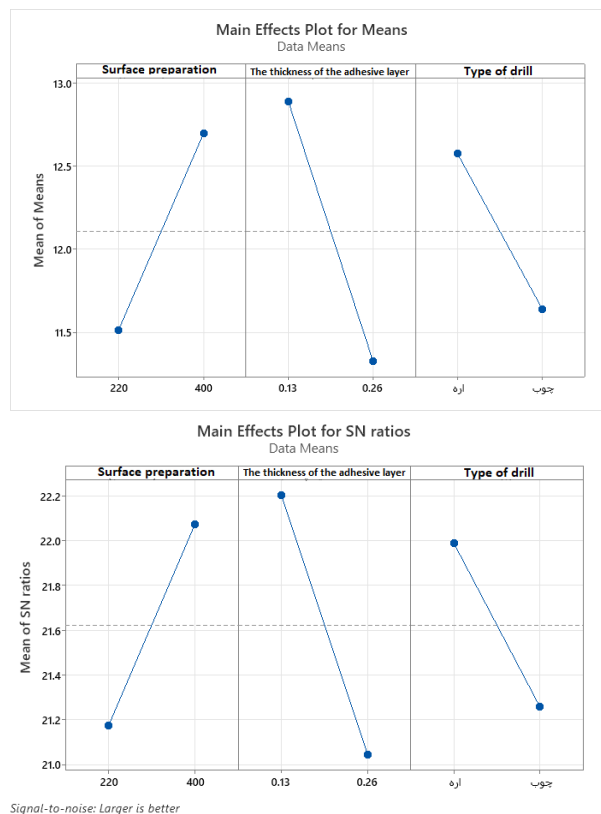


Fig. 31 Diagrams related to the effect of the defined parameters of the composite joint on its strength

شکل 31 نمودارهای مربوط به اثر پارامترهای تعریف شده اتصال ترکیبی بر استحکام آن

15- نتایج تجربی

نتایج تجربی بر اساس آزمون‌های استانداردهای، ASTM، ASTM D638، ASTM D7905 و ASTM D5528، ASTM5868.D3039، که به وسیله دستگاه تست کشش سنتام STM-150 موجود در کارگاه کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، به شرح زیر می‌باشد:

16- خواص مکانیکی چسب

برای استخراج خواص مکانیکی چسب، طبق استاندارد ASTM D638 سه نمونه دامبلی با ابعاد تعریف شده در استاندارد آماده‌سازی شده و پس از پایان فرآیند آماده‌سازی و بررسی کنترل کیفی و طی کردن سیکل پخت در دمای محیط و پس‌پخت، سه نمونه پس از قرار دادن در دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت ایجاد گردید. هدف از انجام آزمون استاندارد کشش چسب، تعیین استحکام کششی و مدول الاستیک در دمای 80 درجه سانتی‌گراد می‌باشد و با توجه به وجود نمودارهای تنش - کرنش چسب در دمای محیط در کار انجام شده [14] از ساخت نمونه‌های مربوط به آن خودداری شده است و نتایج آن در جدول 12 نمایش داده شده است. در شکل 32، نمودار تنش - کرنش مربوط به نمونه‌های دامبلی چسب پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به آن‌ها نشان داده شده است.

در شکل 33 نمونه‌های دامبلی ساخته شده جهت بررسی خواص مکانیکی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد قابل مشاهده است.

همانطور که در شکل 34 قابل مشاهده است تمامی نمونه‌ها از ناحیه‌ای در نزدیکی محل اعمال تب دچار آسیب شده‌اند.

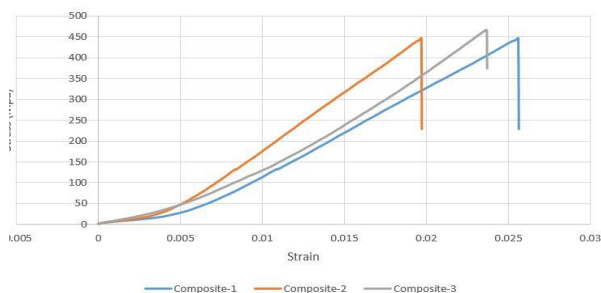


Fig. 35 Stress-strain diagram of composite multilayers under the effect of ambient temperature

شکل 35 نمودار تنش- کرنش چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای محیط

در شکل 36 نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از انجام آزمون کشش نشان داده شده است.

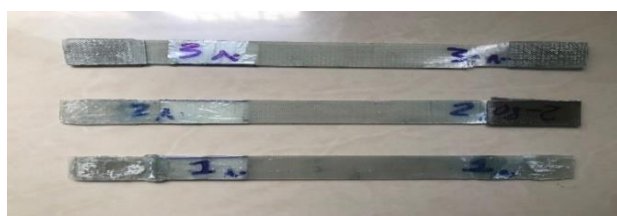


Fig. 36 Multi-layered composite samples under the effect of 80°C temperature after tensile test

شکل 36 نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از انجام آزمون کشش

همانطور که در شکل 36 قابل مشاهده است تخریب به وجود آمده در این نمونه‌ها به مانند نمونه‌های تحت اثر دمای محیط می‌باشد. مکانیسم شکست رخ داده در نمونه‌های این آزمون با توجه به متن استاندارد آزمون از نوع جانبی¹ در محل قرارگیری تب/فک دستگاه آزمون² (LAT) دستگاه کشش رخ داده است. شکل 37 شماتیک بیان شده در متن استاندارد را نشان می‌دهد.



Fig. 37 Schematic expressed in standard text (LAT) [15].

شکل 37 شماتیک بیان شده در متن استاندارد [15] (LAT).

با توجه به وجود محدودیت‌های این پژوهش امکان انجام آزمون فوق با تکرارپذیری بیش از این میسر نشد. با مطالعه متن استاندارد آزمون کشش چندلایه این اجازه داده شده است برای موارد این چنینی که ماکزیم نیروی بدست آمده پایین‌تر از مقدار مورد انتظار بدست آمده است، می‌توان 25 الی 50 درصد ماکزیم نیروی بدست آمده را به آن اضافه نمود. در شکل 38 نمودار تنش-کرنش چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است.

جایگاهی هر یک از نمونه‌های آزمایش شده جمع کرده‌ایم. به دلیل محدودیت‌های مالی و کمبود مواد اولیه قادر به تکرار و انجام این آزمون با تعداد نمونه‌های بیشتر نشدیم و برای همین از روش‌های اصلاح مقادیر بدست آمده برای بازسازی آزمون صورت گرفته بر روی نمونه‌ها استفاده نمودیم.

جدول 12 خواص مکانیکی چسب تحت اثر دمای محیط [14].

Table 12 Mechanical properties of adhesive under the effect of ambient temperature [14].

خواص چسب	نماد	واحد	مقادیر تجربی
مدول الاستیک طولی	E1	MPa	2660
ضریب پواسون	ν_{12}	-	0.35
استحکام نهایی	S1	MPa	22.7

جدول 13 خواص مکانیکی چسب تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

Table 13 Mechanical properties of adhesive under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

خواص چسب	نماد	واحد	مقادیر تجربی
مدول الاستیک طولی	E1	MPa	1702.6
ضریب پواسون	ν_{12}	-	0.35
استحکام نهایی	S1	MPa	18.65

پس از محاسبه مقادیر خواص مکانیکی چسب پس از انجام آزمون کشش نمونه‌های دامیلی مشخص شد که، مقادیر خواص مکانیکی چسب مورد استفاده پس از تأثیرپذیری دمای 80 درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابند که علت رخ دادن این پدیده می‌تواند عبور از حداکثر دما و زمان تشکیل پیوندهای مستحکم و منظم در پلیمر فوق باشد.

17- خواص مکانیکی چندلایه کامپوزیتی

جهت استخراج خواص مکانیکی چندلایه کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM D3093 نمونه‌ها آماده گردید. تعداد کل نمونه‌ها 6 عدد شامل، 3 عدد نمونه در دمای محیط و همچنین 3 نمونه دیگر پس از قرارگرفتن در دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت، آزمون کشش با سرعت 3 میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. در شکل‌های 34 و 35 به ترتیب نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای محیط پس از انجام آزمون کشش و نیز نمودار تنش-کرنش مربوط به آن نشان داده شده است.



Fig. 34 Multi-layer composite samples under the effect of ambient temperature after tensile test

شکل 34 نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای محیط پس از انجام آزمون کشش

² At grip/Tab

¹ Lateral

اتصال آن‌ها نشان داده شده است. Ra یکی از پارامترهای در نظر گرفته شده به منظور بررسی اتصالات چسبی و ترکیبی می‌باشد، در جدول 16 مقادیر بدست آمده پارامتر Ra از سطوح اتصال در حالت‌های بدون اعمال سنباده بر سطح اتصال، اعمال کاغذ سنباده با شماره دانه 220 و 400 بیان شده است. دو نکته قابل ذکر است، یک اندازه‌گیری زبری سطح برای نمونه سنباده‌زنی نشده صرفاً جهت معیار قرار دادن این سطح نسبت به سطوح سنباده‌زنی شده می‌باشد و دومین نکته، مقادیر وارد شده در جدول 16 برای پارامتر یاد شده با کسر میزان انحراف مقدار بدست آمده از مقدار سطح معیار دستگاه می‌باشد.

جدول 16 مقادیر زبری سطوح اتصال

Table 16 The roughness values of the joint surfaces

Ra (میکرومتر)	نوع سطح
6.78	سنباده کاری نشده
3.96	سنباده کاری با کاغذ 220
3.53	سنباده کاری با کاغذ 400

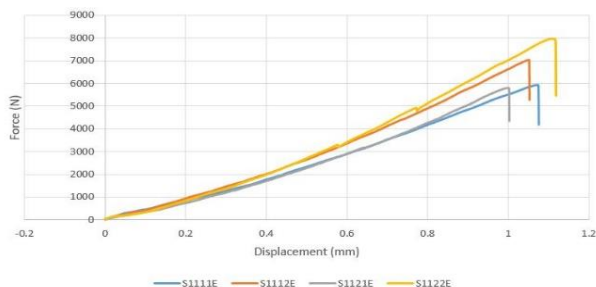


Fig. 39 Diagram of force-displacement of adhesive joints under the effect of ambient temperature

شکل 39 نمودار نیرو-جابجایی اتصالات چسبی تحت اثر دمای محیط

با نگاه بر نمودارهای رسم شده در شکل 39 مشخص می‌شود که نمونه S1122E، به عنوان نمونه بهینه اتصال چسبی با بیشترین نیروی قابل تحمل بدست آمده است. در شکل 40 نواحی اتصالات چسبی ساخته شده در این بخش که پس از قرارگیری در معرض دمای محیط آزمایش شده‌اند، قابل مشاهده است.

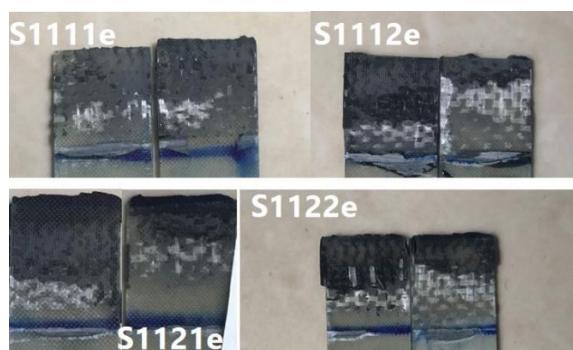


Fig. 40 Areas of adhesive joints under the effect of ambient temperature after failure

شکل 40 نواحی اتصالات چسبی تحت اثر دمای محیط پس از شکست

با مشاهده نواحی اتصالات چسبی پس از شکست شکل 40 مشاهده می‌شود، که با توجه به کیفیت ساخت یکسان نمونه‌های کامپوزیتی که نقش متصل شونده را ایفا می‌کنند، مکانیسم‌های شکست به صورت تقریبی مشابه

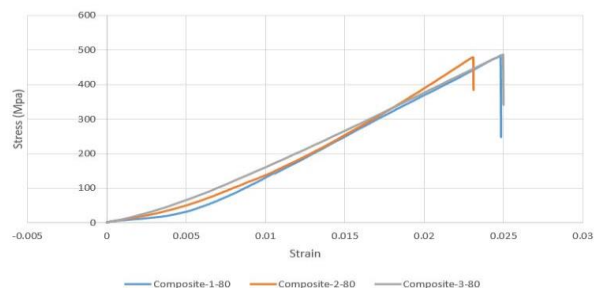


Fig. 38 Stress-strain diagram of composite multilayers under the effect of temperature of 80°C

شکل 38 نمودار تنش- کرنش چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

با در نظر گرفتن میانگین نتایج به دست آمده از نمودارها خواص مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی تعیین می‌گردد. جدول‌های 14 و 15 مقادیر میانگین خواص مکانیکی تعیین شده را نشان می‌دهد.

جدول 14 مقادیر خواص مکانیکی چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای محیط

Table 14 Values of mechanical properties of composite multilayers under the effect of ambient temperature

مقدار	واحد	نماد	خواص کامپوزیت
19907.3	MPa	E1	مدول الاستیک طولی
19907.3	MPa	E2	مدول الاستیک عرضی
0.2	-	ν_{12}	ضریب پواسون
443.26	MPa	S1	استحکام نهایی شکست

جدول 15 مقادیر خواص مکانیکی چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

Table 15 Values of mechanical properties of composite multilayers under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

مقدار	واحد	نماد	خواص کامپوزیت
20886.6	MPa	E1	مدول الاستیک طولی
20886.6	MPa	E2	مدول الاستیک عرضی
0.2	-	ν_{12}	ضریب پواسون
483.19	MPa	S1	استحکام نهایی شکست

با بررسی مقادیر بدست آمده خواص مکانیکی کامپوزیت‌های شیشه اپوکسی مشخص شد که، این خواص پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت افزایش می‌یابند. با توجه به سیکل پخت در نظر گرفته شده برای این نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که علت رخ دادن این پدیده در این نمونه‌ها شکل‌گیری بهتر زنجیره‌های پیوندی بین مولکولی پلیمری رزین مورد استفاده در ساخت این قطعات بوده است. به این معنا که رزین مورد استفاده پس از طی سیکل پخت و اعمال دمای بیان شده همچنان در مسیر بهبود زنجیره‌های پیوندی بین مولکولی قرار داشته است.

18- نتایج آزمون اتصالات تک لبه (SLS)

در شکل‌های 39، 40، 41، 42، 43 و 44 به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات چسبی تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها، نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات پرچی تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها و نیز نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات چسبی تحت اثر دمای محیط و سطح

با بررسی نمودارهای رسم شده در شکل 43 مشخص شد که نمونه S31212، با بیشترین نیروی متحمل شده پیش از شکست به عنوان نمونه بهینه در اتصال ترکیبی بدست آمده است. در شکل 44 سطوح نواحی اتصال ترکیبی پس از شکست نمایش داده شده است.



Fig. 44 Surfaces of composite bonding areas under the effect of ambient temperature after fracture

شکل 44 سطوح نواحی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای محیط پس از شکست

با نگاهی به شکل 44 می‌توان دریافت که مکانیسم شکست در اتصال ترکیبی با شروع و رشد آسیب در لایه چسب از سمت لبه اتصال بوده است و هنگام رسیدن به مرکز اتصال متصل‌کننده مکانیکی را وادار به تحمل نیرو نموده و پس از شکسته شده آن اتصال از هم گسیخته شده است. با دقت بر روی نواحی اتصال آسیب در سطح متصل شونده‌ها مکانیکی به صورت سبک و مربوط به لایه‌های نزدیک به سطح درگیر با لایه چسب می‌باشد. استحکام اتصال برشی T_s و T_t برای نمونه‌های اتصال چسبی، پرچی و ترکیبی تحت اثر دمای محیط محاسبه می‌گردد، که در جدول 17 بیان گردیده است.

جدول 17 خواص بدست آمده اتصالات تحت اثر دمای محیط

Table 17 Obtained properties of joints under the effect of ambient temperature

Tt	Ts	نمونه آزمون اتصال تک لبه
12.158	12.158	اتصال چسبی
2.6405	2.6405	اتصال پرچی
13.013	13.013	اتصال ترکیبی

سپس با استخراج سطوح بهینه پارامترهای تعریف شده برای هر یک از اتصالات، اتصال بهینه ساخته شده پس از قرارگیری در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در مدت زمان 4 ساعت مورد آزمون کشش تک لبه براساس استاندارد فوق قرار داده شده است. نتایج آزمون کشش تک لبه نمونه‌های اتصال چسبی بهینه تحت دمای 80 درجه سانتی‌گراد به صورت منحنی‌های نیرو-جابجایی و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست در شکل‌های 45، 46 نشان داده شده است.

همانطور که در شکل 46 مشخص است، تمامی مکانیسم‌های شکست در این اتصالات همانند اتصالات مشابه تحت اثر دمای محیط می‌باشد. در شکل‌های 47 و 48 نمودار-جابجایی اتصالات پرچی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و نیز سطوح اتصال آن‌ها پس از شکست به نمایش در آمده است.

یکدیگرند و نوع تخریب متصل شونده کامپوزیتی، تخریب در لایه‌های سبک و نزدیک به محل تماس با چسب می‌باشند. همچنین تخریب چسب به عنوان عامل ایجادکننده اتصال بر طبق انتظار با شروع و رشد آسیب از لبه‌های اتصال به مرکز آن کشیده شده و شکست رخ داده است.

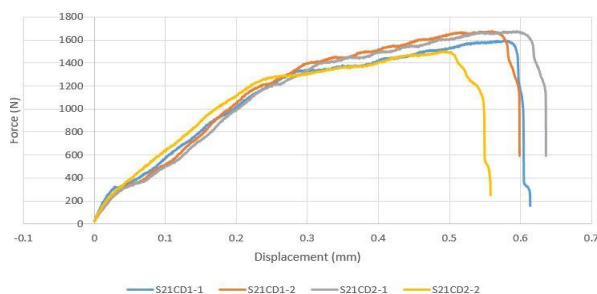


Fig. 41 Diagram of force-displacement of rivet joint under the effect of ambient temperature

شکل 41 نمودار نیرو-جابجایی اتصال پرچی تحت اثر دمای محیط

پس از بررسی نمودارهای رسم شده در شکل 41 مشخص شد نمونه S21cd2-1، نمونه بهینه بدست آمده می‌باشد. در شکل 42 نواحی اتصال پرچی پس از شکست قابل مشاهده است.

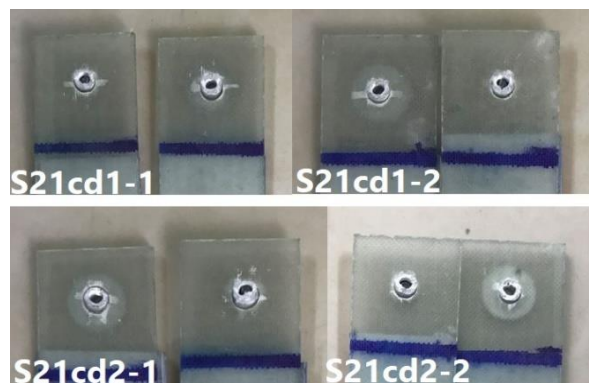


Fig. 42 Rivet joint areas under the effect of ambient temperature after failure

شکل 42 نواحی اتصال پرچی تحت اثر دمای محیط پس از شکست

با بررسی انجام گرفته بر روی نواحی اتصال نمونه‌های پرچی شکل 42 مشاهده می‌شود، با توجه به جنس ماده تشکیل‌دهنده پرچ مورد استفاده در این نوع اتصال آسیب‌هایی بسیار جزئی در سطوح سوراخ ایجاد شده بر روی متصل شونده‌های کامپوزیتی وجود آمده است و تمامی اتصالات از ناحیه متصل شونده یعنی پرچ در راستای برش دچار شکست شده‌اند.

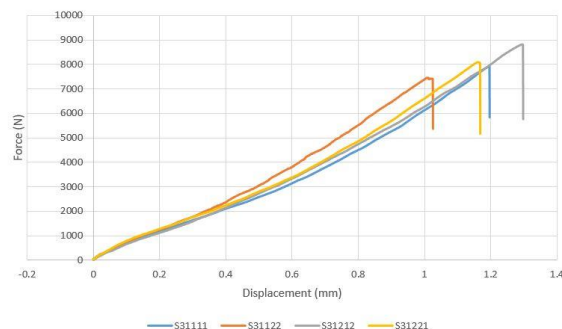


Fig. 43 Force-displacement diagram of composite joint under the effect of ambient temperature

شکل 43 نمودار نیرو-جابجایی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای محیط

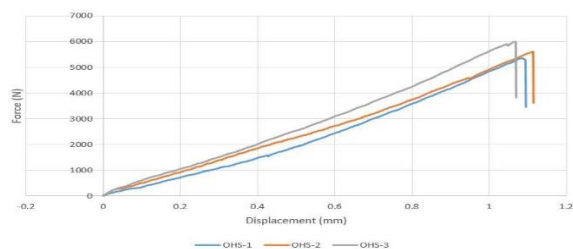


Fig. 49 Force-displacement diagram of composite joint under the effect of temperature of 80°C

شکل 49 نمودار نیرو-جابجایی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

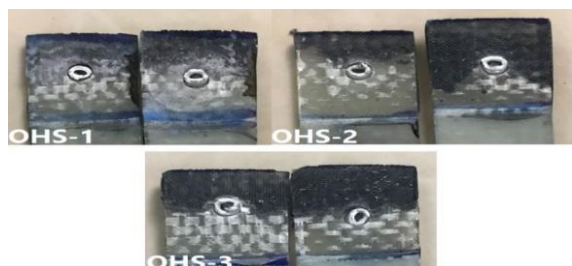


Fig. 50 Optimum composite joint surface under the effect of 80°C temperature after fracture

شکل 50 سطح اتصالات ترکیبی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست

با مقایسه سطح اتصالات ترکیبی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست شکل 50 و سطح اتصالات مشابه تحت اثر دمای محیط مشخص می‌شود که تقریباً هیچ تفاوت محسوسی بین حالت‌های شکست این دو اتصال هم در متصل شونده و همچنین در متصل کننده وجود ندارد.

در جدول 18 استحکام اتصال برشی T_t و T_s برای نمونه‌های اتصالات بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد بیان شده است.

جدول 18 خواص بدست آمده اتصالات تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

Table 18 The obtained properties of joints under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

واحد	T_t	T_s	نمونه آزمون اتصال تک لبه
MPa	8.883	8.883	اتصال چسبی
MPa	2.324	2.324	اتصال پرچی
MPa	8.449	8.449	اتصال ترکیبی

در شکل‌های 51، 52، 53، 54، 55 و 56 به ترتیب نمودار نیرو - جابجایی اتصالات چسبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست، نمودار نیرو - جابجایی اتصالات پرچی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست و نیز نمودار نیرو - جابجایی اتصالات ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست، نشان داده شده است.

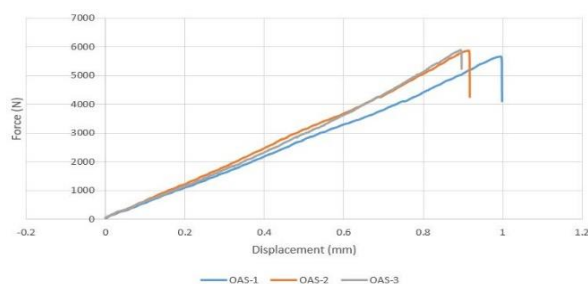


Fig. 45 Diagram of force-displacement of adhesive joint under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 45 نمودار نیرو-جابجایی اتصال چسبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

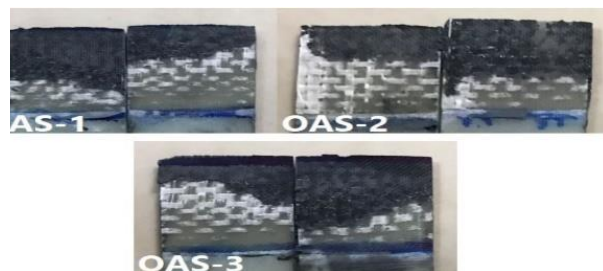


Fig. 46 Optimum adhesive joint surface under the effect of 80°C temperature after failure

شکل 46 سطح اتصالات چسبی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست

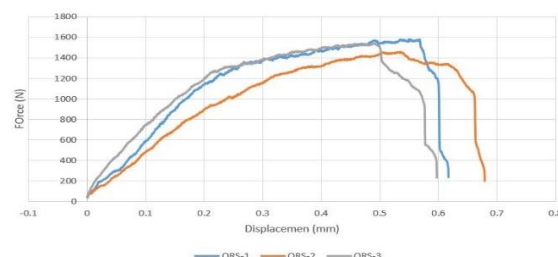


Fig. 47 Diagram of force-displacement of rivet joint under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 47 نمودار نیرو-جابجایی اتصال پرچی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد



Fig. 48 Optimum surface of rivet joints under the effect of temperature of 80°C after failure

شکل 48 سطح اتصالات پرچی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست

با مشاهده شکل 48 می‌توان نتیجه گرفت که مراحل و رخداد‌های شکست در اتصالات فوق تفاوت محسوسی با اتصالات تحت اثر دمای محیط ندارد. در شکل‌های 49 و 50 به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات ترکیبی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و نیز سطح اتصال آن‌ها پس از شکست نشان داده شده است.

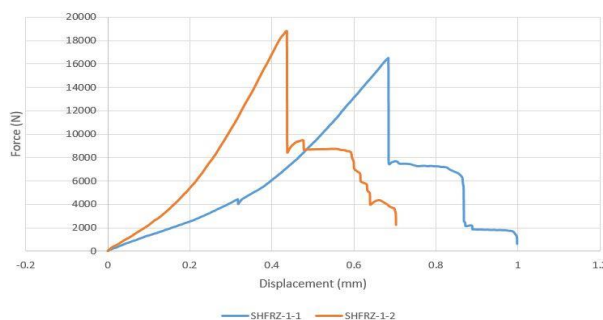


Fig. 55 Force-displacement diagram of composite joint under the effect of ambient temperature

شکل 55 نمودار نیرو-جابجایی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای محیط

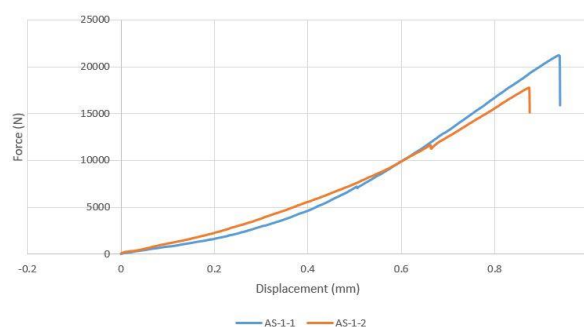


Fig. 51 Diagram of force-displacement of adhesive joint under the effect of ambient temperature

شکل 51 نمودار نیرو-جابجایی اتصال چسبی تحت اثر دمای محیط

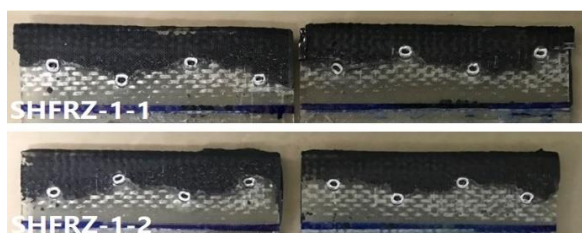


Fig. 56 The surface of composite joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature after failure

شکل 56 سطح اتصالات ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط پس از شکست

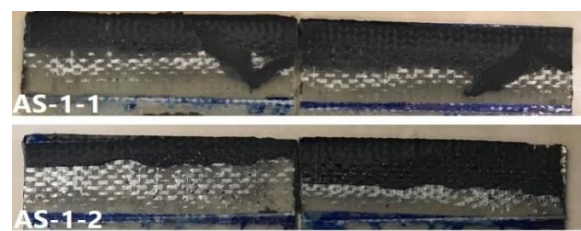


Fig. 52 The surface of adhesive joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature after failure

شکل 52 سطح اتصالات چسبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط پس از شکست

جدول 19 استحکام اتصال برشی T_s و T_t برای نمونه‌های فوق را دربردارد.

جدول 19 خواص بدست آمده اتصالات تحت اثر دمای محیط

Table 19 Obtained properties of joints under the effect of ambient temperature

واحد	T_t	T_s	نمونه آزمون اتصال تک لبه
MPa	6.052	6.052	اتصال چسبی
MPa	1.618	1.618	اتصال پرچی
MPa	5.161	5.161	اتصال ترکیبی

همانطور که در شکل‌های مربوط به سطوح اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی این بخش مشاهده می‌شود، مکانیسم‌های تخریب در تمامی اتصالات همانند شرایط بوجود آمده در اتصالات ساخته شده استاندارد می‌باشد. البته با توجه به نحوه آرایش پرچ‌ها در اتصالات پرچی و ترکیبی که به صورت زیگزاگ در نظر گرفته شده است مشاهده می‌شود که پرچ‌هایی که بیشترین فاصله تا محل فک متحرک دستگاه کشش را دارند بلافاصله پس از تخریب چسب، نیروی وارده را تحمل می‌کنند و به همین ترتیب پرچ‌های نزدیک‌تر درگیر در تحمل این نیرو می‌شوند.

در شکل‌های 57، 58، 59، 60، 61 و 62 به ترتیب نمودار نیرو-جابجایی اتصالات چسبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست، نمودار نیرو-جابجایی اتصالات پرچی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست و نیز نمودار نیرو-جابجایی اتصالات ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست نشان داده شده است.

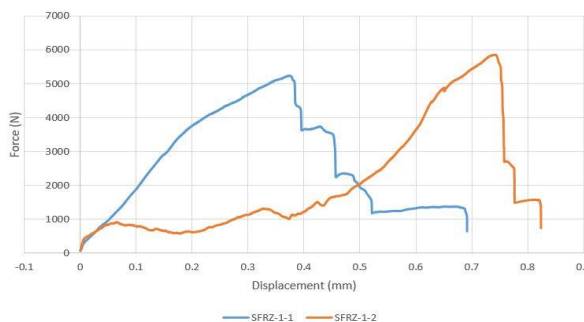


Fig. 53 Diagram of force-displacement of rivet joint under the effect of ambient temperature

شکل 53 نمودار نیرو-جابجایی اتصال پرچی تحت اثر دمای محیط

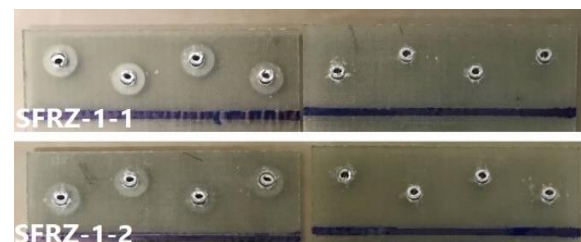


Fig. 54 The surface of rivet joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature after failure

شکل 54 سطح اتصالات پرچی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط پس از شکست

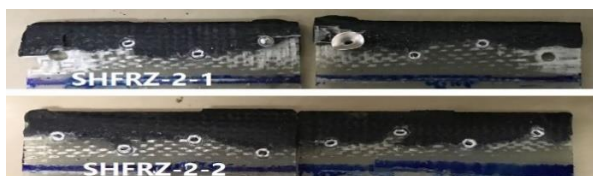


Fig. 62 Surface of composite joints based on zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80°C after failure

شکل 62 سطح اتصالات ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست

جدول 20 استحکام اتصال برشی Ts و Tt برای نمونه‌های فوق را دربردارد.

جدول 20 خواص بدست آمده اتصالات تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

Table 20 The obtained properties of joints under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

واحد	Tt	Ts	نمونه آزمون تک لبه
MPa	5.558	5.558	اتصال چسبی
MPa	1.493	1.493	اتصال پرچی
MPa	4.903	4.903	اتصال ترکیبی

با مشاهده تصاویر مربوط به سطوح اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی ساخته شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ که تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که تقریباً تفاوت محسوسی در حالت‌های شکست این نمونه‌ها با سایر نمونه‌ها به وجود نیامده است. البته این نکته شایان ذکر است که در نمونه‌های اتصال پرچی و ترکیبی، در قسمت‌هایی از گوشه‌های متصل‌شونده‌های کامپوزیتی شاهد کاهش ضخامت هستیم که در این نواحی متصل‌شونده در محل ایجاد سوراخ دچار پارگی شده است و به همین دلیل متصل‌کننده مکانیکی اعمال شده در آن قسمت، دچار آسیب نهایی نگردیده است.

19- مقایسه تحلیلی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی

پس از انجام آزمون‌های استاندارد مختلف و بررسی خواص چسب، کامپوزیت و رزین متأثر از دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد و مقایسه نتایج اتصالات مد نظر طراحی آزمایش نمونه با بیشترین میزان استحکام به عنوان نمونه تجربی بهینه انتخاب شد و در ابتدا با توجه به مقادیر فاکتورهای بهینه از هر کدام 3 عدد نمونه تجربی ساخته شد و تحت دمای 80 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت سپس براساس مقادیر بدست آمده از آزمایش مواد تشکیل‌دهنده اتصالات در دمای محیط و دمای 80 درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس صورت گرفت. در شکل (63) مقایسه نتیجه عددی و تجربی اتصال بهینه ترکیبی استاندارد به عنوان نماینده شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشان داده شده است.

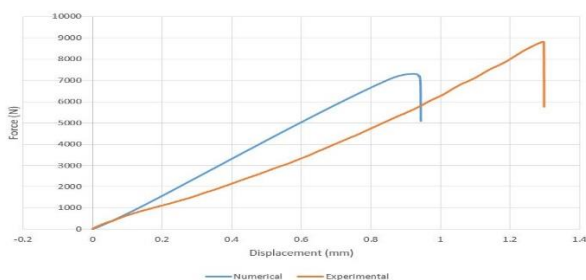


Fig. 63 Numerical and experimental results of hybrid joint

شکل 63 نتایج عددی و تجربی اتصال ترکیبی

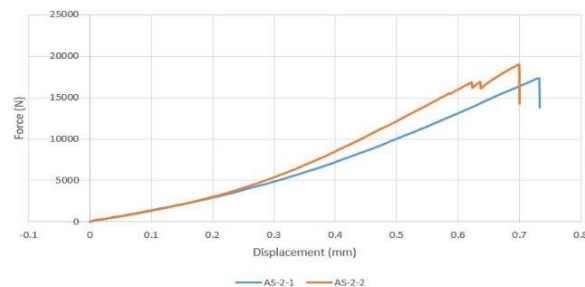


Fig. 57 Force-displacement diagram of adhesive joint under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 57 نمودار نیرو- جابجایی اتصال چسبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد



Fig. 58 The surface of adhesive joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80 °C after failure

شکل 58 سطح اتصالات چسبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست

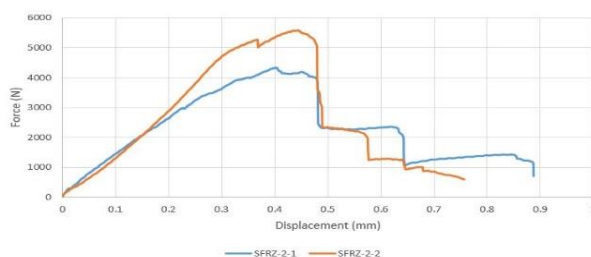


Fig. 59 Force-displacement diagram of rivet joint under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 59 نمودار نیرو- جابجایی اتصال پرچی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

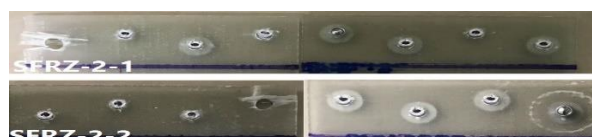


Fig. 60 The surface of rivet joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80 °C after failure

شکل 60 سطح اتصالات پرچی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست

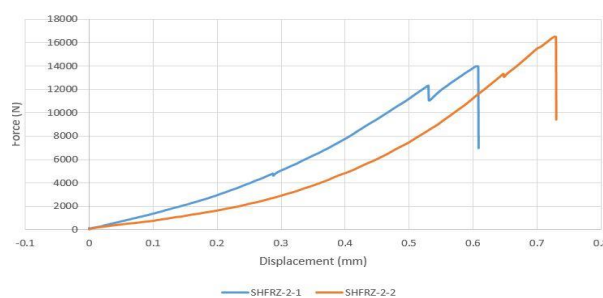


Fig. 61 Force-displacement diagram of composite joint under the effect of temperature of 80°C

شکل 61 نمودار نیرو- جابجایی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

جدول 22 نیروی بیشینه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

Table 22 The maximum strength of adhesive, riveted and combined joints under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

نمونه	نیروی بیشینه عددی (N)	نیروی بیشینه تجربی (N)	درصد اختلاف (%)
اتصال چسبی	5264.1	6051.96	13.01
اتصال پرچی	1640.6	1511.93	8.51
اتصال ترکیبی	6727.79	5826.03	15.47

در شکل‌های 66 و 67 و جدول‌های 23 و 24 به ترتیب نمودارها و مقادیر نیروی بیشینه نمونه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی در نمونه‌های تجربی و عددی با آرایش زیگزاگ چهار پرچ نشان داده شده است. نام‌گذاری این نمونه‌ها همانند نمونه‌های استاندارد بوده با این تفاوت که پسوندی به صورت عددی و حروفی به منظور معرفی استفاده از آرایش چهار پرچ در طراحی ناحیه اتصال افزوده می‌شود.

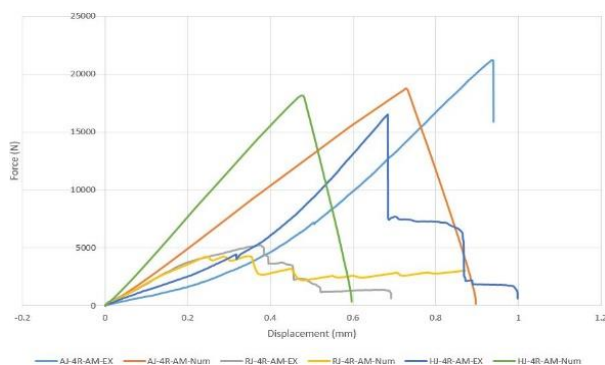


Fig. 66 Comparison of curves of experimental results and numerical simulation of joints based on zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature

شکل 66 مقایسه منحنی‌های نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی اتصالات براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط.

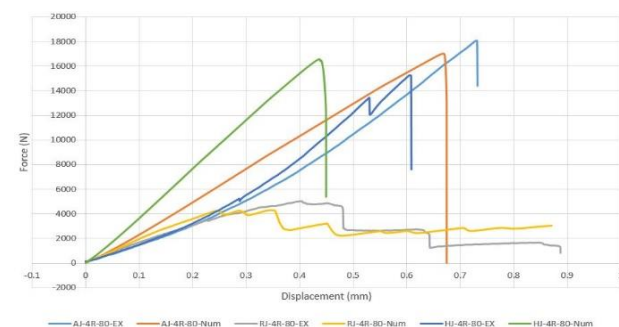


Fig. 67 Comparing the curves of experimental results and numerical simulation of joints based on zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 67 مقایسه منحنی‌های نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی اتصالات بر اساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد.

در شکل‌های 64 و 65، نمودارهای مربوط به مقایسه صورت گرفته بین نتایج تجربی و عددی شبیه‌سازی شده اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی استاندارد تحت اثر دو دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. نام‌گذاری هریک از نمودارها به صورت حروف ابتدایی اتصال چسبی¹، اتصال پرچی² و اتصال ترکیبی³ با پسوندهایی که به ترتیب معرف دمای مورد نظر، دمای محیط⁴ و دمای 80 درجه سانتی‌گراد و نیز مشخص نمودن نوع تجربی⁵ و عددی⁶ بودن منحنی می‌باشد.

جداول 21 و 22، نیروی بیشینه نمونه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی در حالت تجربی و عددی را نشان می‌دهد.

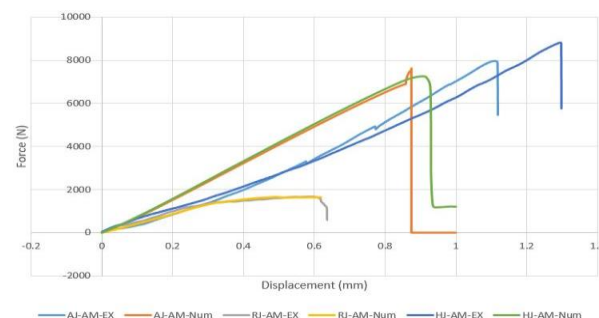


Fig. 64 Comparison of curves of experimental results and numerical simulation of standard joints under the effect of ambient temperature

شکل 64 مقایسه منحنی‌های نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی اتصالات استاندارد تحت اثر دمای محیط

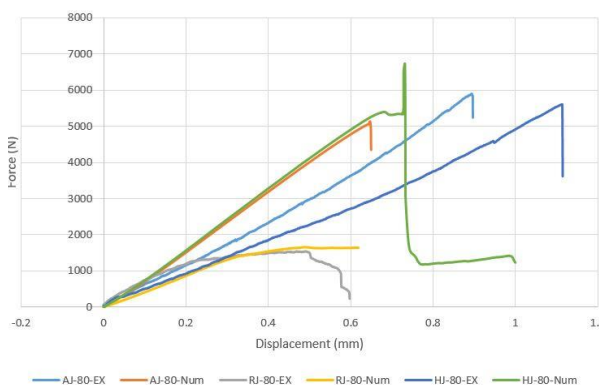


Fig. 65 Comparison of the curves of experimental results and numerical simulation of standard joints under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 65 مقایسه منحنی‌های نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی اتصالات استاندارد تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

جدول 21 نیروی بیشینه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی تحت اثر دمای محیط

Table 21 The maximum strength of adhesive, riveted and combined joints under the effect of ambient temperature

نمونه	نیروی بیشینه عددی (N)	نیروی بیشینه تجربی (N)	درصد اختلاف (%)
اتصال چسبی	7604.2	7946.1	3/4
اتصال پرچی	1640.6	1620.65	1.23
اتصال ترکیبی	7312.94	8814.3	17.03

¹ Adhesive joint

² Riveted joint

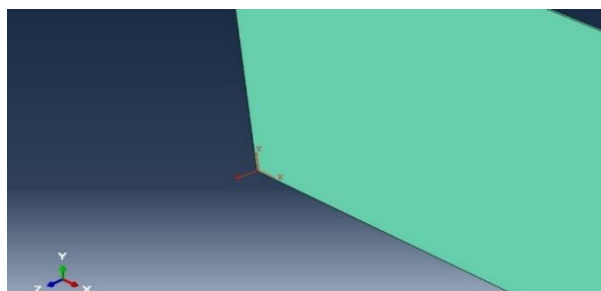
³ Hybrid joint

⁴ Ambient

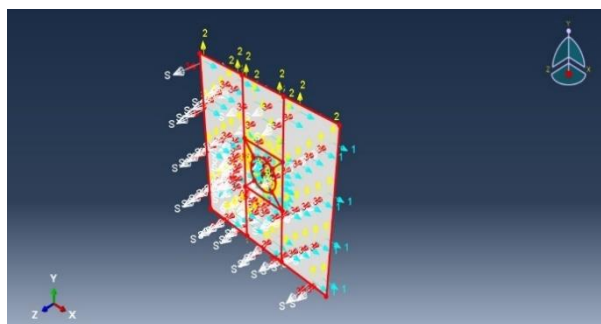
⁵ Experimental

⁶ Numerical

برای مشخص شدن نوع خروجی‌های استخراج شده از شبیه‌سازی عددی در شکل 68 (الف) مختصات تعریف شده برای یک تک لایه کامپوزیتی، (ب) مختصات معرفی شده برای لایه چسب در مدل‌های شبیه‌سازی شده اتصالات به نمایش در آمده است.



(الف - الف)



(ب - ب)

Fig. 68 (a) Coordinates defined for a single composite layer, (b) Coordinates introduced for the adhesive layer in the simulated joint models.

شکل 68 (الف) مختصات تعریف شده برای یک تک لایه کامپوزیتی، (ب) مختصات معرفی شده برای لایه چسب در مدل‌های شبیه‌سازی شده اتصالات.

مطابق شکل 68 دستگاه مختصات (X, Y, Z) برای تک لایه کامپوزیتی و دستگاه مختصات (1.2.3) برای لایه چسب شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شده است. محورهای دستگاه‌های مختصات تعریف شده برطبق نوشتار، از چپ به راست دو به دو با یکدیگر متناظرند و در یک راستا قرار دارند. براساس دستگاه‌های مختصات تعریف شده مؤلفه تنش برشی در صفحه (1.2) که متناظر صفحه (X, Y) می‌باشد، قرار دارد. پس از بررسی‌های صورت پذیرفته بر روی مدل‌های شبیه‌سازی شده اتصالات مشخص شد مقدار بیشینه هر یک از پارامترها (تقریبی) مربوط به نزدیک‌ترین لایه کامپوزیتی شبیه‌سازی شده به متصل‌کننده می‌باشد. زمان و محدوده انتخاب شده برای بررسی مقادیر تغییرات در تمامی مؤلفه‌های استخراج شده از مدل‌های شبیه‌سازی شده در محدوده الاستیک (Step Time=0.2) نمودارهای نیرو-جابجایی متناظر هر یک از اتصالات شبیه‌سازی شده می‌باشد. علت انتخاب ناحیه الاستیک این است که اتصال در آن، در محدوده ایمن خود قرار دارد (پیش از بروز هرگونه ترک) و بهینه‌سازی‌ها معمولاً در این محدوده از تغییرات مکانیکی اعمال می‌شود. در شکل 69 مسیر انتخاب شده جهت استخراج مؤلفه تنش برشی S12 از سطح تک لایه کامپوزیتی در ناحیه اتصال نشان داده شده است.

ناحیه سطح اتصال نشان داده شده در شکل 69، مربوط به اتصال چسبی استاندارد تحت اثر دمای محیط می‌باشد که به عنوان نماینده اتصالات شبیه‌سازی شده آورده شده است. علت انتخاب لبه متصل شونده در بخش

جدول 23 نیروی بیشینه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط

Table 23 The maximum strength of adhesive, riveted and combined joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature

نمونه	نیروی بیشینه عددی (N)	نیروی بیشینه تجربی (N)	درصد اختلاف (%)
اتصال چسبی	18559.7	19263.75	3.65
اتصال پرچی	4265.63	5231.2	18.45
اتصال ترکیبی	18104.6	17492.45	3.49

جدول 24 نیروی بیشینه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد.

Table 24 The maximum strength of adhesive, riveted and combined joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

نمونه	نیروی بیشینه عددی (N)	نیروی بیشینه تجربی (N)	درصد اختلاف (%)
اتصال چسبی	16940.5	18163.85	6.73
اتصال پرچی	4265.63	4879.85	12.58
اتصال ترکیبی	16552.9	15237.4	8.63

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، اتصال ترکیبی بیشینه بار و در نهایت استحکام بیشتری نسبت به دو اتصال چسبی و پرچی به صورت ترکیبی از خود نشان می‌دهد. لذا این موضوع نشان‌دهنده اهمیت و اعتبار این اتصال نسبت به آن دو می‌باشد. همانطور که در جدول‌های 21، 22، 23 و 24 قابل مشاهده است، پس از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته اختلافاتی میان بیشینه نیروی قابل تحمل اتصالات در بررسی تجربی و عددی مشهود است. این اختلاف در هر یک از اتصالات قابل بررسی می‌باشد. در اتصال چسبی (AJ یا AJ-4R) این میزان اختلاف می‌تواند ناشی از ناکافی بودن تعداد دانه‌بندی لایه چسب در شبیه‌سازی عددی باشد که با توجه به محدودیت سخت‌افزاری سیستم اجرای نرم‌افزار آباکوس، اجتناب‌ناپذیر بوده است. همچنین اختلافی که میان سایر عناصر مؤثر در افزایش استحکام اتصال چسبی در بررسی تجربی از جمله طول ناحیه اتصال، ضخامت لایه چسب و... باشد که با توجه به در دسترس نبودن قید و بند استاندارد به وجود آمده است. این نکته قابل ذکر می‌باشد که تفاضل‌های بیان شده کمتر از میزانی است که نتایج این آزمون‌ها را فاقد اعتبار نماید. در اتصال پرچی (RJ یا RJ-4R) یکی از دلایل ایجاد اختلاف میان پاسخ بیشینه نیروی قابل تحمل در بخش عددی و تجربی می‌تواند از نقطه‌نظر تعداد دانه‌بندی در تحلیل عددی و پیش‌نیروی که در هنگام اعمال پرچ در بررسی تجربی در نظر گرفته نشده است، باشد. مجموع دلایل فوق می‌تواند دلایل ایجاد اختلاف میان نتایج عددی و تجربی اتصال ترکیبی (HJ یا HJ-4R) باشد. با توجه به حجم وسیع و گسترده خروجی‌هایی که می‌توان از شبیه‌سازی‌های به دست آمده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس استخراج نمود سعی شده تا خروجی‌های با اهمیت ویژه از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته استخراج شود.

مختصات در نظر گرفته شده مؤلفه S22 معرف این پارامتر می‌باشد. با بررسی سطوح نواحی اتصال به طور مثال شکل 72 مشاهده می‌شود که تخریب در سطح ناحیه اتصال متصل شونده‌ها به علت کیفیت بالای قطعات ساخته شده به صورت تخریب الیاف سبک و سطحی می‌باشد، از همین رو جهت بررسی تغییرات مؤلفه تنش‌های پوست‌کنی سطح اتصال نزدیک‌ترین تک لایه کامپوزیتی به متصل‌کننده‌ها به عنوان محل بررسی انتخاب شده است. در شکل 73، مسیر انتخاب شده بر روی ناحیه اتصال متصل‌شونده کامپوزیتی جهت بررسی تغییرات تنش پوست‌کنی نشان داده شده است.

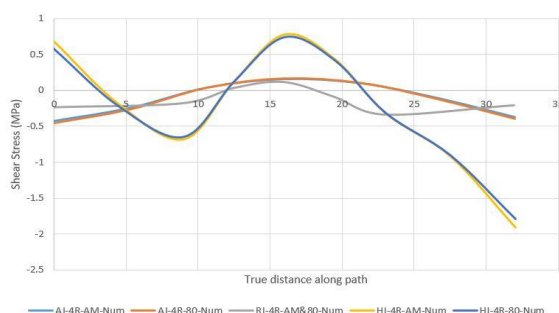


Fig. 71 Diagrams related to the shear stress component S12 of the simulated samples based on the zigzag arrangement of four rivets
 شکل 71 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش برشی S12 نمونه‌های شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ

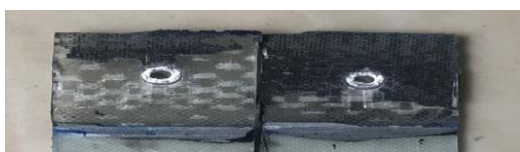


Fig. 72 Joint area of the experimental sample

شکل 72 ناحیه اتصال نمونه تجربی.

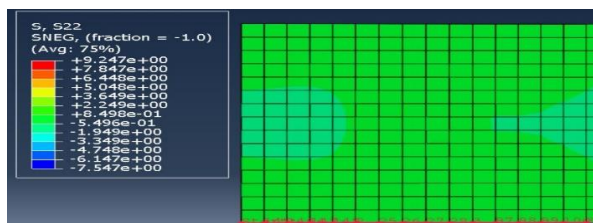


Fig. 73 The path chosen to extract the S22 peeling stress component from the composite single layer surface in the joint area

شکل 73 مسیر انتخاب شده جهت استخراج مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 از سطح تک لایه کامپوزیتی در ناحیه اتصال

ناحیه سطح اتصال نشان داده شده در شکل 73 مربوط به اتصال چسبی استاندارد تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد می‌باشد که به عنوان نماینده اتصالات شبیه‌سازی شده آورده شده است. در شکل 74 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 اتصالات شبیه‌سازی شده استاندارد براساس نام‌گذاری معرفی شده در بخش خروجی بیشینه نیروی قابل تحمل هر یک از اتصالات نشان داده شده است.

با مشاهده نمودارهای رسم شده در شکل 74 می‌توان نقاط بحرانی در فواصل مختلف از لبه متصل شونده‌ها و نوع تنش وارده با توجه به علامت مثبت (کششی) و منفی (فشاری) آن‌ها را مشخص نمود. در شکل 75 نمودار مربوط به مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 اتصالات شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ بیان شده است.

طول ناحیه اتصال به عنوان مسیر بررسی تغییرات مؤلفه‌های تنش محاسبه شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس بیشینه بودن مقادیر این مؤلفه‌ها در این ناحیه از متصل شونده‌ها می‌باشد. در شکل 70 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش برشی S12 اتصالات شبیه‌سازی شده استاندارد براساس نام‌گذاری معرفی شده در بخش خروجی بیشینه نیروی قابل تحمل هر یک از اتصالات نشان داده شده است.

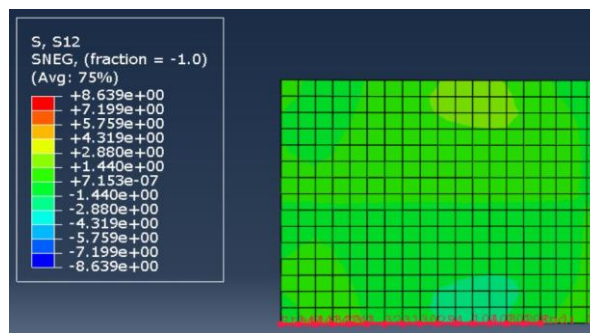


Fig. 69 The path chosen to extract the S12 shear stress component from the composite single layer surface in the joint area

شکل 69 مسیر انتخاب شده جهت استخراج مؤلفه تنش برشی S12 از سطح تک لایه کامپوزیتی در ناحیه اتصال

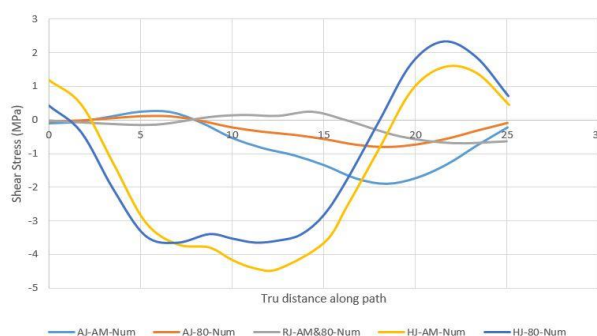


Fig. 70 Diagrams related to shear stress component S12 of simulated joints

شکل 70 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش برشی S12 اتصالات شبیه‌سازی شده

همانطور که در شکل‌های 69 و 70 مشخص است، محدوده در نظر گرفته شده برای بررسی تغییرات مؤلفه تنش برشی از لبه آزاد تک لایه کامپوزیتی به سمت انتهای داخلی لبه سطح ناحیه اتصال متصل شونده‌ها می‌باشد. با مشاهده نمودارهای شکل 70 می‌توان تفسیری از نوع مؤلفه تنش‌های برشی وارده بر هر یک از قسمت‌های سطح ناحیه اتصال متصل شونده‌ها داشت به طوریکه مقادیر منفی مؤلفه‌های تنش نشان‌دهنده نوع فشاری آن بوده و مقادیر مثبت حکایت از کششی بودن این مؤلفه‌ها در نقطه اثر متناظرشان بر روی سطح اتصال دارند. در شکل 71 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش برشی S12 نمونه‌های شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل 71 قابل مشاهده است، نمودارهای متناظر هم (اتصالات مشابه) اختلافات ناچیزی دارند اما این نکته به طور ثابت رعایت شده است که مقادیر مؤلفه تنش در هر دو شکل 70 و 71 برای اتصالات در دمای محیط بیشتر از مقادیر در فواصل در نظر گرفته شده از لبه متصل شونده‌های کامپوزیتی متناظر در دمای 80 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. یکی دیگر از خروجی‌های مهم، تنش پوست‌کنی می‌باشد که با توجه به دستگاه‌های

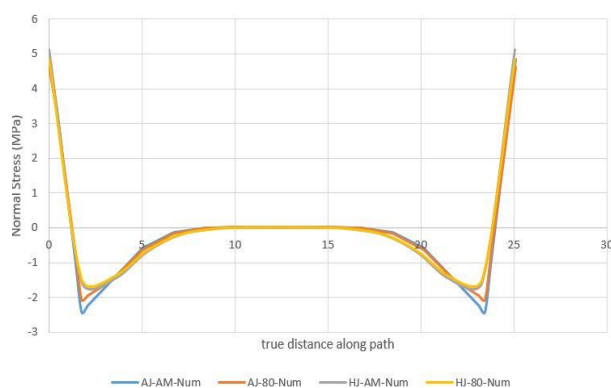


Fig. 77 Diagrams of changes in normal stress component S33 at the edge of adhesive layers of simulated standard joints

شکل 77 نمودارهای تغییرات مؤلفه تنش نرمال S33 در لبه لایه‌های چسب اتصالات استاندارد شبیه‌سازی شده

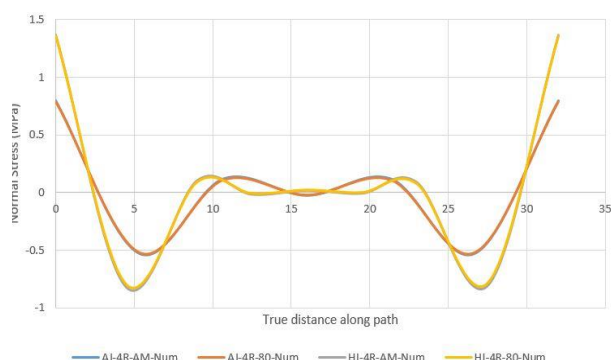


Fig. 78 Diagrams related to the changes in the normal stress component S33 in the adhesion layer of simulated joints based on the zigzag arrangement of four rivets.

شکل 78 نمودارهای مربوط به تغییرات مؤلفه تنش نرمال S33 در لایه چسب اتصالات شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ

پس از بررسی و تجزیه و تحلیل صورت گرفته بر روی نمودارهای مربوط به مؤلفه‌های تنش S12، S22 که از سطح ناحیه اتصال نزدیک‌ترین تک لایه متصل‌شونده کامپوزیتی شبیه‌سازی شده نسبت به متصل‌کننده استخراج شده است و همچنین مؤلفه تنش S33 که مربوط به بررسی صورت گرفته از لایه چسب مدل شده می‌باشد، مشخص شد که تمامی مؤلفه‌های تنش مورد بررسی در نمونه‌های تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های تحت اثر دمای محیط با توجه به کاهش بیشینه نیروهای قابل تحمل، کاهش پیدا کرده‌اند.

20- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تجربی و عددی اثر شرایط محیطی دمایی بر استحکام کششی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی پرداخته شد. نتایج حاکی از آن است که:

1- در آنالیز صورت گرفته در نرم‌افزار طراحی آزمایش مینی‌تب براساس روش تاگوچی، مشخص شد که بیشترین اثر در استحکام اتصال چسبی و ترکیبی مربوط به تغییرات ضخامت لایه چسب می‌باشد. ضخامت‌های در نظر گرفته شده برابر 0.13 و 0.26 میلی‌متر می‌باشد که در اتصال چسبی نمونه دارای ضخامت لایه چسب 0.26 میلی‌متر به عنوان نمونه بهینه و نیز در

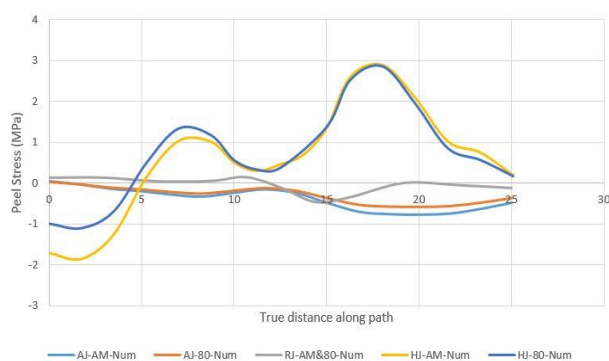


Fig. 74 S22 Peeling Stress Component Diagrams of Standard Simulated Joints

شکل 74 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 اتصالات شبیه‌سازی شده استاندارد

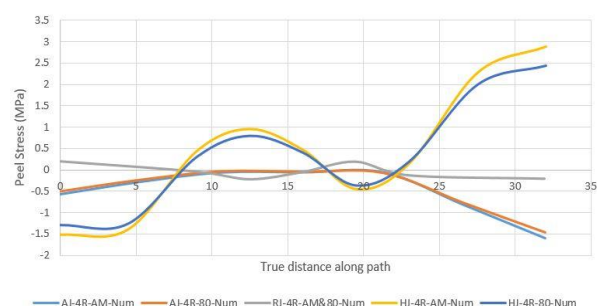


Fig. 75 Diagram related to the peeling stress component S22 of the simulated joints based on the zigzag arrangement of four rivets

شکل 75 نمودار مربوط به مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 اتصالات شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ

مؤلفه تنش نرمال S33 هم یکی از پارامترهای مهم و قابل بررسی می‌باشد. از همین رو تغییرات تنش نرمال در مسیر نشان داده شده در شکل 76 مربوط به لایه چسب مدل اتصالات شبیه‌سازی شده استخراج نموده‌ایم. در شکل 77 نمودارهای تغییرات تنش نرمال در لبه لایه‌های چسب اتصالات استاندارد شبیه‌سازی شده قابل مشاهده است.

با مشاهده و بررسی نمودارهای رسم شده در شکل 77 به راحتی می‌توان نقاط بحرانی لایه چسب از نقطه‌نظر مقادیر بیشینه مؤلفه تنش نرمال در سرتاسر طول ناحیه اتصال و مکان متناظر آن‌ها را شناسایی کرد و در جهت کنترل و بهینه‌سازی آن‌ها در پژوهش‌های آتی تلاش نمود. در شکل 78 نمودارهای مربوط به تغییرات مؤلفه تنش نرمال S33 در لایه چسب اتصالات شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ قابل مشاهده می‌باشد.

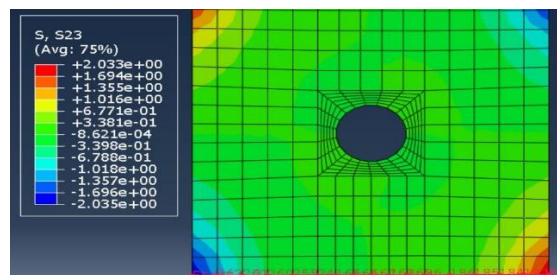


Fig. 76 The path chosen to extract the normal stress component S33 from the surface of the adhesive layer

شکل 76 مسیر انتخاب شده جهت استخراج مؤلفه تنش نرمال S33 از سطح لایه چسب

اتصال ترکیبی نمونه دارای ضخامت لایه چسب 0.13 میلی‌متر به عنوان نمونه بهینه شناخته شدند.

2- در بررسی‌های صورت گرفته در آزمون کشش نمونه دامبلی چسب آکسون در دمای محیط و دمای 80 درجه سانتی‌گراد مشخص شد که، مدول الاستیک و استحکام نهایی نمونه‌های تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد به ترتیب 18.93 و 11.19 درصد کاهش نسبت به مقدار بدست آمده از نمونه‌های متأثر از دمای محیط را از خود نشان می‌دهد. این کاهش خواص نشان از آن دارد که پس از پس‌پخت انجام گرفته شده بر روی چسب اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت در دامنه تضعیف ساختار پلیمری چسب اثرگذار بوده است.

3- در بررسی انجام گرفته در تعیین خواص چندلایه کامپوزیتی (شیشه/اپوکسی) مشخص شد که مدول الاستیک و استحکام نهایی آن پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت نسبت به دمای محیط به ترتیب به میزان 4.91 و 9 درصد افزایش را از خود نشان می‌دهد. این افزایش را می‌توان از دو منظر مورد بررسی قرار داد اول آنکه می‌توان نتیجه گرفت که اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت هیچ اثر تخریبی بر روی الیاف تشکیل‌دهنده چندلایه نمی‌گذارد و دوم آنکه پس از انجام عملیات پس‌پختی که بر روی نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی صورت گرفته است، دمای اعمال شده، 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت در راستای شکل‌گیری هرچه بهتر زنجیره‌های پلیمری رزین مورد استفاده در این تحقیق عمل نموده است.

4- برطبق مقایسه انجام شده بر روی بیشترین نیروی قابل تحمل و استحکام برشی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی (استاندارد) در دو دمای محیط و دمای 80 درجه سانتی‌گراد مشخص شد که، در اتصال چسبی بهینه این مقادیر پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت به ترتیب به میزان 23.8 و 27.61 درصد کاهش را نسبت به مقادیر بدست آمده برای این اتصال در دمای محیط را از خود نشان می‌دهد همچنین مقدار پارامترهای یاد شده در اتصال پرچی پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت، به میزان 3.86 و 11.98 درصد کاهش را در مقابل مقادیر بدست آمده در شرایط دمای محیط از خود نشان دادند. در نهایت در اتصال ترکیبی بهینه مقادیر بیشترین نیروی قابل تحمل، استحکام برشی اتصالات پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت به ترتیب 31.92 و 34.68 درصد کاهش نسبت به مقادیر بدست آمده در دمای محیط را از خود نشان می‌دهد.

5- پس از انجام آزمون‌های کشش بر روی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی در حالت استاندارد آن‌ها، در این تحقیق اقدام به تعریف ساختار اتصال بر مبنای اعمال چهار پرچ با آرایش زیگزاگ در پهنا ناحیه اتصال نمودیم و نمونه‌هایی جهت آزمون کشش در دو شرایط دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد مهیا شد. هدف از این کار ایجاد یک بررسی و مقایسه میان حداکثر نیروی قابل تحمل، استحکامات برشی اتصالات در حالت استاندارد و حالت ایجاد شده متأثر از آرایش زیگزاگ پرچ در راستای پهنای ناحیه اتصال بوده است. به همین منظور پارامترهای حداکثر نیروی قابل تحمل، استحکام برشی در اتصال چسبی در حالت تعریف شده در دمای 80 درجه سانتی‌گراد 5.7 و 8.16 درصد کاهش را نسبت به مقادیر بدست آمده در دمای محیط از خود نشان می‌دهد، همچنین در اتصال پرچی با اعمال چهار پرچ با آرایش زیگزاگ در راستای پهنای ناحیه اتصال مقادیر حداکثر نیروی قابل تحمل، استحکام برشی بدست آمده از نمونه‌های تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد به ترتیب

10.94 و 11.18 کاهش را نسبت به مقادیر بدست آمده در دمای محیط از خود نشان می‌دهند. میزان انحراف پارامترهای یاد شده در اتصال ترکیبی با اعمال چهار پرچ با آرایش زیگزاگ پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای محیط به ترتیب برابر 12.89 و 4.99 درصد به صورت کاهشی از خود نشان داده است.

6- در طی بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که در اتصالات جدید تعریف شده براساس نمونه‌های استاندارد، با طی مراحل یکسان برای هر دو حالت استاندارد و تعریف شده (آرایش زیگزاگ 4 پرچ در ناحیه اتصال)، کمترین میزان افت خواص مابین حالت بررسی شده در دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد را در نمونه‌هایی که براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ در راستای پهنای ناحیه اتصال ساخته شده است را شاهد هستیم.

7- پس از بررسی و محاسبات انجام شده بر روی داده‌های خروجی آزمون انرژی شکست در مود اول (DCB) مشخص شد مقدار انرژی شکست چسب و رزین در مود اول پس از اعمال شرایط دمایی 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت به ترتیب 45.74 درصد کاهش و 11.67 درصد افزایش را از خود نشان داده است.

8- با انجام محاسبات و مقایسه بین خروجی‌های آزمون انرژی شکست در مود دوم (ENF) مشخص شده که انرژی شکست چسب و رزین در مود دوم پس از اعمال شرایط دمایی 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت به ترتیب 34.75 درصد کاهش و 19.9 درصد افزایش را از خود نشان داده‌اند.

9- پس از انجام شبیه‌سازی عددی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس و ایجاد خروجی ماکزیمم نیروی قابل تحمل و مقایسه آن با مقدار همین پارامتر در نمونه‌های تجربی و محاسبه اختلاف بین آن‌ها مشخص شد که مدل‌های شبیه‌سازی شده قابل اعتماد می‌باشند.

10- پس از انجام سیر این تحقیق مشخص شد که بیشترین تأثیر در ایجاد یک اتصال ترکیبی (چسبی-پرچی) مستحکم وابسته به تغییرات ضخامت لایه چسب می‌باشد و پس از آن آماده‌سازی سطح بیشترین اثر را خواهد داشت.

11- پس از اعمال دما مورد نظر در اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی مشخص شد که در تمامی موارد شاهد کاهش استحکام هستیم اما این کاهش در هر کدام از اتصالات به صورت جداگانه قابل بررسی است. در اتصال چسبی و ترکیبی نشان می‌دهد که چسب اعمال شده در ناحیه اتصال پس از طی کردن سیکل پخت و پس‌پخت به حداکثر توان خود رسیده و پس از آن دچار افت خواص می‌شود که با توجه به نتایج آزمون کشش چسب منطقی به نظر می‌رسد، اما در اتصال پرچی با توجه به افت استحکام که به میزان ناچیز (کمتر از 15 درصد) رخ داده است و بر طبق این نکته که پیشتر اعلام شد، خواص آلومینیوم به کاربرده شده در پرچ در دماهای بالا تغییراتی را از خود بروز می‌دهند، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر بدست آمده ثابت و بدون تغییر بوده‌اند.

21- مراجع

- [1] Dadian, R. and Zulfiqari, A. "Improving the strength quality of composite-steel edge joint by grading the joint area using carbon and glass fibers and also creating a possible conflict using the reverse step method," Composite science and technology, Vol. 6, No. 3, 393-400, 2019.
- [2] Morgado, M. A., Carbas, R. J. C., Dos Santos, D. G., & Da Silva, L. F. M. "Strength of CFRP joints reinforced with adhesive

- layers". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 97, 102475, 2020.
- [3] Fernández-Cañadas, L. M., Ivañez, I., Sanchez-Saez, S., & Barbero, E. J. "Effect of adhesive thickness and overlap on the behavior of composite single-lap joints". *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 28, No. 11, 1111-1120, 2021.
- [4] Sonat, E., & Özerinç, S. "Failure behavior of scarf-bonded woven fabric CFRP laminates". *Composite Structures*, 258, 113205, 2021.
- [5] Hage, J. E., Challita, G., Capelle, J., Gilgert, J., & Alhussein, A. "Influence of short-time thermal ageing on the behaviour of double lap composite adhesively bonded joints". *SN Applied Sciences*, 2, 1-12, 2020.
- [6] Dadian, A., & Rahnama, S. "Experimental and numerical study of optimum functionally graded Aluminum/GFRP adhesive lap shear joints using Epoxy/CTBN". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 107, 102854, 2021.
- [7] Li, W., Guo, S., Giannopoulos, I. K., He, S., & Liu, Y. "Strength enhancement of bonded composite laminate joints reinforced by composite Pins". *Composite Structures*, 236, 111916, 2020.
- [8] Li, X., Cheng, X., Guo, X., Liu, S., & Wang, Z. "Tensile properties of a hybrid bonded/bolted joint: parameter study". *Composite Structures*, 245, 112329, 2020.
- [9] Farahani & Safari. "Studying the effects of sanding process on the strength of adhesive joints". *Amirkabir Mechanical Engineering Journal*. Vol. 50, No. 3, 619-626, 2018.
- [10] Yang, G., Yang, T., Yuan, W., & Du, Y. "The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints". *Composites Part B: Engineering*, 160, 446-456, 2019.
- [11] Khoran, M., Amirabadi, Safari, H., H &, Habibullah. "Investigating the drilling of composites with a drill". *mechanical engineering*. Vol. 24, No. 5, 69-78, 2015.
- [12] Ali Arefi Asgoi/Ali Davar. "Optimizing the width, thickness and cell size of carbon/epoxy mesh composite plate in order to increase flexural strength. Master's thesis", *Mechanical Engineering (Composite Materials), Research Institute of Materials and Manufacturing Technologies, Malik Ashtar University of Technology*, 1400, 2021.
- [13] Bagci, M. "Determination of solid particle erosion with Taguchi optimization approach of hybrid composite systems". *Tribology International*, 94, 336-345, 2016.
- [14] Ezzine, M. C., Amiri, A., Tarfaoui, M., & Madani, K. "Damage of bonded, riveted and hybrid (bonded/riveted) joints, Experimental and numerical study using CZM and XFEM methods". *Advances in aircraft and spacecraft science*, Vol. 5, No. 5, 595, 2016.
- [15] ASTM. ASTM D638-14: "Standard test method for tensile properties of plastics". ASTM, 2014.



حل تحلیلی تنش‌ها در پوسته کروی مخزن چندلایه کامپوزیتی جدار نازک تحت فشار داخلی به کمک تئوری کلاسیک پوسته‌ها

حسین فرج الهی¹، غلامحسین رحیمی^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-111، rahimi_gh@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله:

چکیده

دریافت: 1402/08/07

پذیرش: 1402/10/02

کلیدواژگان

حل تحلیلی،

تئوری کلاسیک،

پوسته کروی،

مخزن کامپوزیتی چندلایه،

جدار نازک

به دست آوردن مقادیر تنش‌ها در پوسته کروی یک مخزن چندلایه کامپوزیتی جدار نازک به روشی کاملاً تحلیلی و بدون نیاز به استفاده از روش‌های عددی در حل معادلات، موضوعی است که تاکنون بررسی نشده است. در این مقاله با استفاده از حلی کاملاً تحلیلی به کمک تئوری کلاسیک پوسته‌ها، مقادیر تنش‌ها در هر لایه از پوسته کروی مخزن چندلایه کامپوزیتی جدار نازک به دست آمده است. در این روش حل با استفاده از معادلات تعادل، قانون هوک، روابط کرنش - جابجایی و انحنا - جابجایی، معادلات حاکم بر پوسته دوران‌یافته عمومی کامپوزیتی استخراج گردیده و سپس معادلات حاکم بر پوسته کروی متقارن به دست آمده‌اند. در ادامه به کمک معادلات سازگاری جابجایی و چرخش، نیروها و تنش‌ها در تقاطع پوسته کروی و استوانه کامپوزیتی استخراج شده‌اند و پس از آن تنش‌های طولی و محیطی در پوسته کروی مخزن کامپوزیتی جدار نازک تحت فشار داخلی در هر لایه به دست آمده‌اند. در نهایت نتایج حل کاملاً تحلیلی بر مبنای تئوری کلاسیک پوسته‌ها با نتایج حل عددی اجزاء محدود مقایسه شده و نشان داده شده است مقادیر تنش حاصل از نتایج تحلیلی انطباق خوبی با نتایج حل عددی دارند و می‌توان با استفاده از نتایج این حل تحلیلی مخازن کامپوزیتی را به صورت بهینه طراحی نمود.

Analytical solution for stresses in the spherical shell of a thin-wall composite multi-layer vessel under internal pressure by using the classical theory of shells

Hossein Farajollahi¹, Gholamhossein Rahimi^{1*}

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, rahimi_gh@modares.ac.ir

Keywords

Analytical Solution, Classic Theory, Spherical Shell, Multi-Layer Composite Vessel, Thin-Walled

Abstract

Obtaining stress values in spherical shell of a thin-walled composite multi-layer vessel in a completely analytical way and independent of numerical methods in solving the equations is a subject that has not been investigated so far. In this article, using a fully analytical solution based on classical shell theory, the stress values in each layer of the spherical shell are obtained. In this solution method, by using equilibrium equations, Hooke's law, strain-displacement and curvature-displacement relations, the governing equations of general composite shells of revolution are extracted and then the governing equations of a symmetric spherical shell are obtained. In the following, using displacement and rotation consistency equations, forces and stresses at the intersection of the spherical and cylindrical composite shell are calculated, and then the longitudinal and circumferential stresses due to internal pressure are extracted in each layer. Finally, the results are compared with the results of the finite element numerical solution and it is shown that the stress values obtained from the analytical results are in good agreement with the results of the numerical solution and it is possible to use the results of this analytical solution to make optimally designed composite vessels.

1- مقدمه

تحت فشار داخلی اشاره نمود. هر چند استفاده از این مواد در این صنایع به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا در مقابل مواد فلزی، مزایای چشمگیری دارد و رو به رشد است اما در مقابل تحلیل سازه‌ای این مواد می‌تواند در مواردی نسبت به مواد فلزی پیچیده‌تر باشد. یکی از این پیچیدگی‌ها، تحلیل تنش در مخزن چندلایه‌ای است.

با پیشرفت فناوری در حوزه مواد کامپوزیتی و گسترش ابزارهای تحلیلی برای این مواد، به کارگیری آن‌ها در صنایع مختلف همچون خودروبی و هوافضا روز به روز در حال افزایش است. از مهم‌ترین کاربردهای کامپوزیت‌ها در صنایع خودروبی و هوافضا می‌توان به ساخت بدنه‌های کامپوزیتی چندلایه جدار نازک

Please cite this article using:

Farajollahi, H., Rahimi, G., "Analytical solution for stresses in the spherical shell of a thin-wall composite multi-layer vessel under internal pressure by using the classical theory of shells," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2297-2311, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2013986.1863>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

مرجع [18]، به بررسی رفتار سازه‌ای با استفاده از تئوری خمشی برای پوسته کامپوزیتی اورتوتروپیک با هدف کمینه نمودن ناپیوستگی تنش پرداخت. محدودیت این بررسی فرض اورتوتروپیک بودن و نیاز به حل عددی روابط نهایی بود. رحیمی در مرجع [19]، رفتار مخزن کامپوزیتی با آستری فلزی را بررسی نمود. وی تنها در بخش آستری که فلزی بود بر اساس تئوری خمشی روابط تحلیلی را ارائه نمود. پادووک در مرجع [20]، به تحلیل تنش عدسی‌های کروی و ژئودزیک مخزن کامپوزیتی با استفاده از تئوری غشایی و بهره‌گیری از تئوری کلاسیک در هر لایه و بدون در نظر گرفتن ناپیوستگی تنش پرداخت. ردی در مرجع [21]، به منظور استخراج تحلیلی تنش‌ها با استفاده از تئوری خمشی برای یک پوسته با دو شعاع انحنای و با بهره‌گیری از تئوری برشی مرتبه اول توانست در حالت خاص لایه‌چینی اورتوتروپ و ویژه و شرط مرزی خاص روابط تحلیلی را ارائه نماید. از محدودیت‌های این بررسی وجود جواب تحلیلی در لایه‌چینی و شرط مرزی خاص بود (طراحی مخزن کامپوزیتی به‌گونه‌ای است که نمی‌توان از لایه‌چینی اورتوتروپ ویژه استفاده نمود). همچنین در این مرجع اشاره‌ای به استخراج ناپیوستگی تنش‌ها در تقاطع دو پوسته نشده است. آندر در مرجع [22]، با استفاده از حل تحلیلی الاستیسیته دوبعدی بر مبنای تئوری لکینیستی و در اثر بارگذاری فشار داخلی، با اعمال شرایط تنش صفحه‌ای و تابع تنش چندجمله‌ای، تنش‌ها را در مخزن کامپوزیتی چندلایه به دست آورد. راموس در مرجع [23] و تاکایانگی در مرجع [24]، با استفاده از حل تحلیلی و تئوری الاستیسیته سه‌بعدی و با استفاده از توابع تنش، مقادیر تنش‌ها را در مخزن کامپوزیتی چندلایه به دست آوردند. ویگنولی در مرجع [25]، با استفاده از روش چند مقیاسی تنش‌ها را در مخزن کامپوزیتی تحت فشار داخلی به دست آورد. وی با استفاده از روابط خواص الیاف و رزین خواص معادل هر لایه را به دست آورد و سپس با استفاده از حل الاستیسیته سه‌بعدی و تئوری لکینیستی و به کارگیری توابع تنش، قانون هوک و روابط کرنش - جابجایی، تنش‌ها را برای زوایای متفاوت لایه‌چینی و کسرهای حجمی متفاوت الیاف استخراج نمود. محدودیت روش نویسندگان مراجع [22]، [23]، [24] و [25] در نظر گرفتن اثر عدسی با نیروی معادل و استخراج تنش‌ها تنها در پوسته استوانه‌ای بود و نتوانستند تنش‌ها در عدسی و همچنین تنش‌های تقاطع دو پوسته را به دست آورند. از آن‌جا که هندسه عدسی مخزن کامپوزیتی کروی است در ادامه مرور تاریخچه، به معرفی برخی از این تحقیقات نیز پرداخته خواهد شد. سایاد در مرجع [26]، با استفاده از تئوری برشی مرتبه بالا تنش‌ها در پوسته کروی را استخراج نمود. وی در این مقاله از توابع تنش برشی چندجمله‌ای مختلفی استفاده نمود و توانست توزیع تنش‌های برشی عرضی در راستای ضخامت را با استفاده از روش نایبر به دست آورد. محدودیت روش وی ارائه جواب تحلیلی فقط در حالت شرط مرزی ساده بود. قانسان در مرجع [27]، با استفاده از تئوری برشی مرتبه اول و بالاتر و با استفاده از روش اصل انرژی پتانسیل کمینه، تنش‌ها را برای شرایط مرزی مختلف در پوسته کروی به دست آورد. محدودیت روش وی حل نیمه‌تحلیلی و تخمین جابجایی‌ها با استفاده از سری‌های فوریه بود. سالواتور در مرجع [28] و الاوندی در مرجع [29]، با استفاده از حل الاستیسیته سه‌بعدی و با به کارگیری روش نایبر معادلات تعادل را در پوسته با دو شعاع انحنای و با شرط مرزی ساده حل نمودند و تنش‌ها را به صورت تحلیلی به دست آوردند. محدودیت روش آن‌ها استخراج تنش‌ها تنها در حالت شرط تکیه‌گاهی ساده بود. جین در مرجع [30]، با استفاده از حل الاستیسیته سه‌بعدی و با استفاده از روش ریلی ریتز، معادلات را برای شرایط مرزی مختلف در پوسته کروی حل نمود. محدودیت روش وی استفاده از روش حل عددی برای استخراج جواب‌ها بود.

پیشینه پژوهش برای به دست آوردن تنش‌ها در مخازن فلزی و کامپوزیتی جدار نازک تحت فشار داخلی را می‌توان به سه دسته کلی، تحلیلی، عددی و تجربی دسته‌بندی نمود. از میان این سه دسته به حل تحلیلی پرداخته می‌شود و به دلیل صحت‌گذاری با روش عددی، مراجعی که حل عددی را انجام داده‌اند نیز به صورت اجمالی بررسی می‌شوند. بتی در مرجع [1]، با استفاده از حل عددی و مدل دوبعدی، تنش‌ها را در مخزن کامپوزیتی به دست آورد. کرونه در مرجع [2]، با استفاده از حل عددی و انتخاب مدل سه‌بعدی تنش‌ها را در مخزن کامپوزیتی استخراج نمود. ماتالونی در مرجع [3]، با استفاده از حل عددی و بهره‌گیری از مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، تنش‌ها را در مخزن کامپوزیتی به دست آورد. اورتوران در مرجع [4]، با استفاده از مقایسه نتایج حل عددی با استفاده از مدل دوبعدی با نتایج آزمون، تنش‌ها را در مخزن کامپوزیتی استخراج نمود. بتن در مرجع [5]، با استفاده از مقایسه نتایج حل عددی مدل سه‌بعدی و آزمون، تنش‌ها را در مخزن کامپوزیتی به دست آورد. حیدری رارانی در مرجع [6]، به تشریح نحوه مدل‌سازی مخزن کامپوزیتی با استفاده از حل اجزاء محدود پرداخت. صفرآبادی در مراجع [7] و [8]، نحوه مدل‌سازی مخزن کامپوزیتی با استفاده از حل اجزاء محدود را بررسی نمود و زوایای بهینه پیچش را مورد بررسی قرار داد. آکار در مرجع [9] و کومار در مرجع [10] با استفاده از آزمون، تنش‌ها را در مخزن کامپوزیتی استخراج نمودند. در مراجع [10-1]، اشاره‌ای به استخراج تنش‌ها با استفاده از حل تحلیلی نشده است. هاوگتون در مرجع [11]، روابط تحلیلی برای به دست آوردن ناپیوستگی تنش در مخزن فلزی تحت فشار داخلی در تقاطع استوانه با عدسی کروی را ارائه نمود. سپس با استفاده از روابط تحلیلی توزیع تنش در عدسی کروی و استوانه را به دست آورد. راوو در مرجع [12]، از روش تحلیلی با استفاده از تئوری کلاسیک برای به دست آوردن تنش‌ها در هر لایه از مخزن کامپوزیتی فشار داخلی استفاده نمود. موستهک در مرجع [13]، از روش تحلیلی با استفاده از تئوری برشی مرتبه اول برای به دست آوردن تنش‌ها در هر لایه از مخزن کامپوزیتی تحت فشار داخلی استفاده نمود. محدودیت روش نگارندگان مراجع [12] و [13] استفاده از بار معادل به جای در نظر گرفتن اثر عدسی‌ها بود و توزیع تنش‌ها را فقط در بخش استوانه‌ای به دست آورد. مدهوی در مرجع [14]، از روش تحلیلی با استفاده از تئوری برشی مرتبه اول و سوم برای به دست آوردن تنش‌ها در هر لایه از مخزن کامپوزیتی تحت فشار داخلی استفاده نمود. محدودیت روش وی استفاده از بار معادل به جای استخراج نیروها در تقاطع دو پوسته و در نظر گرفتن مخروط ناقص به جای عدسی کروی و استخراج تنش‌ها در بخش استوانه‌ای و عدسی معادل بود. اکولد در مرجع [15]، جابجایی‌ها و تنش‌ها در مخزن کامپوزیتی اورتوتروپیک تحت فشار داخلی با عدسی کروی را به دست آورد. کومار در مرجع [16]، جابجایی‌ها و تنش‌ها در مخزن کامپوزیتی اورتوتروپیک تحت فشار داخلی با عدسی‌های تخت، بیضی و مخروطی را به دست آورد. از محدودیت‌های مراجع [15] و [16]، استفاده از پوسته استوانه‌ای به جای پوسته کروی در محاسبه نیروهای تقاطع دو پوسته، استفاده از فرض اورتوتروپیک و استفاده از خواص معادل برای کل لایه‌ها و محاسبه جابجایی‌ها و تنش‌ها، فقط در بخش استوانه‌ای اشاره نمود و در این تحقیقات اشاره‌ای به روابط در بخش عدسی‌ها نشده است. والری در مرجع [17]، با استفاده از روش خمشی و به کارگیری تئوری برشی، روابط تحلیلی را برای پوسته کامپوزیتی برای هر لایه به دست آورد. محدودیت این روابط تعداد بالای معادلات و مرتبه بالای معادلات بود که خود مانع از حل تحلیلی روابط بود و نیاز به حل عددی معادلات داشت. همچنین وی در این مرجع اشاره‌ای به روش به دست آوردن ناپیوستگی‌های تنش‌ها در تقاطع دو پوسته عدسی و استوانه و همچنین استخراج تنش‌ها در عدسی نداشت. لائو در

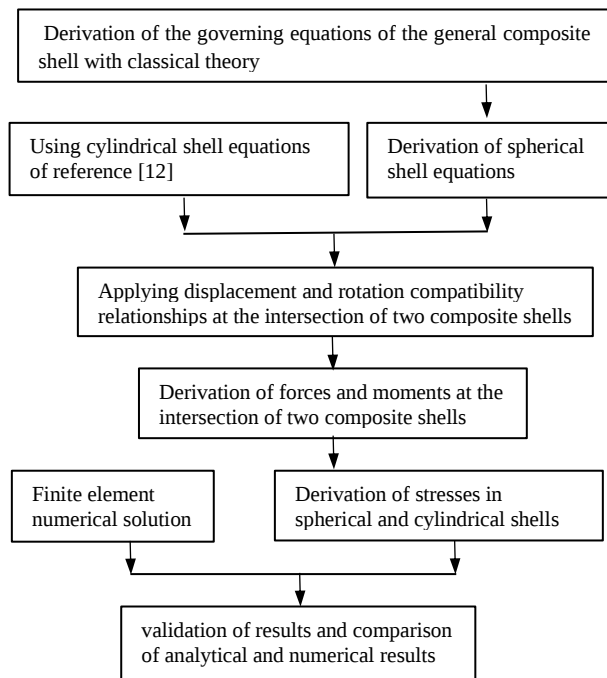


Fig. 2 Algorithm for extracting stresses in each layer of cylindrical and spherical shells using analytical solution

شکل 2 الگوریتم استخراج تنش‌ها در هر لایه و در پوسته‌های استوانه‌ای و کروی با استفاده از حل تحلیلی

3- استخراج معادلات حاکم بر پوسته دوران‌یافته عمومی کامپوزیتی با استفاده از تئوری کلاسیک پوسته‌ها

در این بخش معادلات حاکم بر پوسته دوران‌یافته عمومی کامپوزیتی با استفاده از تئوری کلاسیک به دست می‌آیند بدین منظور ابتدا از روابط تعادل، روابط کرنش-جابجایی و انحنا-جابجایی و قانون هوک اشاره شده در مرجع [31] استفاده می‌شود. روابط تعادل برای پوسته دوران‌یافته حول محور در حالت بارگذاری متقارن محوری در رابطه (a-1) تا (c-1) آورده شده است [31].

$$\frac{d}{d\phi}(N_\phi r_0) - N_\theta r_1 \cos\phi - r_0 Q_\phi = 0 \quad (a-1)$$

$$N_\phi r_0 + N_\theta r_1 \sin\phi + \frac{d}{d\phi}(r_0 Q_\phi) = 0 \quad (b-1)$$

$$\frac{d}{d\phi}(M_\phi r_0) - M_\theta r_1 \cos\phi - Q_\phi r_0 r_1 = 0 \quad (c-1)$$

در دسته روابط 1، θ راستای محیطی، ϕ راستای نصف‌النهاری، N_θ و M_θ به ترتیب منته‌های نیرو و گشتاور محیطی، N_ϕ و M_ϕ منته‌های نیرو و گشتاور نصف‌النهاری، Q_ϕ منته نیروی برشی نصف‌النهاری، r_1 شعاع انحنا و r_0 شعاع پوسته در راستای محیطی هستند. معادله (a-1) را می‌توان با معادله (2) جانشانی نمود [31].

$$N_\phi = -Q_\phi \cot\phi \quad (2)$$

روابط کرنش-جابجایی و انحنا-جابجایی مطابق با رابطه (a-3) تا (g-3) بیان شده است [31].

در هیچ‌کدام از مراجع، تنش‌ها در پوسته کروی مخزن چندلایه کامپوزیتی جدار نازک به روش کاملاً تحلیلی به دست نیامده است. در مقاله حاضر با استفاده از حلی کاملاً تحلیلی (بدون نیاز به استفاده از روش‌های عددی در حل معادلات) و به کمک تئوری کلاسیک پوسته‌ها، تنش‌ها در پوسته کروی مخزن چندلایه کامپوزیتی جدار نازک تحت فشار داخلی به دست آمده است. سپس نتایج به دست آمده از حل تحلیلی با حل عددی اجزاء محدود صحت سنجی شده‌اند و نشان داده شد انطباق خوبی بین نتایج وجود دارد.

2- معرفی مسئله و الگوریتم حل

مخزن کامپوزیتی چندلایه جدار نازک، تحت فشار داخلی با لایه‌چینی متقارن $(\pm\phi)_s$ شامل دو پوسته استوانه‌ای و کروی است که در شکل 1 نشان داده شده است.

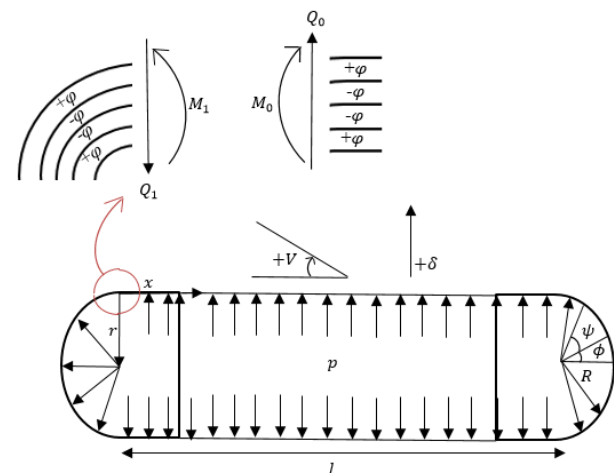


Fig. 1 Schematic of thin wall composite vessel with symmetrical layering under internal pressure

شکل 1 شماتیک مخزن جدار نازک کامپوزیتی با لایه‌چینی متقارن تحت فشار داخلی

l طول بخش استوانه‌ای، R شعاع مخزن، p فشار داخلی، ω جابجایی در راستای عمود بر پوسته، V چرخش، Q_0 نیروی برشی در تقاطع دو پوسته در لبه استوانه‌ای، M_0 گشتاور خمشی در تقاطع دو پوسته در لبه استوانه‌ای، Q_1 نیروی برشی در تقاطع دو پوسته در لبه عدسی کروی، M_1 گشتاور خمشی در تقاطع دو پوسته در لبه عدسی کروی، ϕ راستای نصف‌النهاری، ψ زاویه نسبت به ϕ ، ϕ زاویه لایه‌چینی و x و r دستگاه مختصات هستند. جهت مثبت جابجایی رو به بیرون و همچنین جهت مثبت چرخش برای استوانه و عدسی، ساعت‌گرد است. با توجه به متقارن بودن لایه‌چینی $(\pm\phi)_s$ در مخزن کامپوزیتی نسبت به سطح میانی و همچنین بارگذاری متقارن، پوسته متقارن محوری در نظر گرفته شده است.

همان‌گونه که اشاره شد در این مقاله معادلات حاکم بر پوسته کامپوزیتی کروی به روش تحلیلی و با استفاده از تئوری کلاسیک استخراج می‌گردد و در پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی نیز از معادلات مرجع [15] استفاده می‌شود. انتخاب تئوری کلاسیک در روش حل تحلیلی به دلیل جدار نازک بودن مخزن کامپوزیتی و کوچک بودن تنش‌های عرضی و امکان صرف‌نظر از این تنش‌های عرضی است. تنش‌ها در پوسته کروی مخزن کامپوزیتی با استفاده از حل تحلیلی و به کارگیری تئوری کلاسیک مطابق با الگوریتم شکل 2 به دست می‌آیند.

$$V_b = \frac{1}{r_1}(v_b + \frac{d\omega_b}{d\phi}) \quad (a-6)$$

$$Y_b = Q_{\phi b} r_2 \quad (b-6)$$

با جایگذاری روابط (a-5) تا (d-5) و (a-6) و (b-6) در رابطه (c-1) و پس از ساده‌سازی، اولین معادله حاکم بر پوسته دوران‌یافته کامپوزیتی متقارن محوری مطابق با رابطه (7) به دست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} & \frac{r_2}{r_1^2} \frac{d^2 V_b}{d\phi^2} + \frac{1}{r_1} \left(\frac{d}{d\phi} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{r_2}{r_1} \cot\phi \right) \frac{dV_b}{d\phi} - \frac{1}{r_1} \left(\frac{D_{12}}{D_{11}} - \frac{1}{D_{11}} \cot\phi \right) \frac{dD_{12}}{d\phi} \\ & + \frac{r_2}{r_1} \frac{1}{D_{11}} \frac{dD_{11}}{d\phi} \frac{dV_b}{d\phi} - \frac{Y_b}{D_{11}} = -\frac{1}{D_{11}} \end{aligned} \quad (7)$$

با استفاده از روابط (a-6) و (b-6)، رابطه (2) با رابطه (8) جانشانی می‌شود.

$$N_{\phi b} = -Q_{\phi b} \cot\phi = -\frac{1}{r_2} Y_b \cot\phi \quad (8)$$

با جانشانی رابطه (8) و رابطه (g-3) در رابطه (b-1)، رابطه (9) به دست خواهد آمد.

$$N_{\theta b} = -\frac{1}{r_1} \frac{d}{d\phi} (r_2 Q_{\phi b}) = -\frac{1}{r_1} \frac{dY_b}{d\phi} \quad (9)$$

با استفاده از روابط (a-5) و (b-5) و روابط (8) و (9)، دومین معادله حاکم بر پوسته دوران‌یافته کامپوزیتی مطابق با رابطه (10) به دست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} & (A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}}) V_b = \frac{r_2}{r_1^2} \frac{d^2 Y_b}{d\phi^2} + \frac{1}{r_1} \frac{dY_b}{d\phi} \left(\frac{d}{d\phi} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{r_2}{r_1} \cot\phi \right) \\ & + \left(A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right) \frac{d}{d\phi} \left(\frac{1}{(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \right) \\ & - \frac{Y_b}{r_1} \left(\frac{r_1 A_{22}}{r_2 A_{11}} \cot^2\phi - \frac{A_{12}}{A_{11}} \right) \\ & + \cot\phi \left(A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right) \times \frac{d}{d\phi} \left(\frac{A_{12}}{A_{11} (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

به منظور ساده‌سازی، ضخامت لایه‌ها و زاویه لایه‌چینی ثابت در نظر گرفته می‌شود فلذا تابعیت صلبیت‌های کششی و خمشی نسبت به ϕ از بین می‌رود و معادلات (7) و (10) به معادلات (a-11) و (b-11) تبدیل می‌شوند.

$$\begin{aligned} & \frac{r_2}{r_1^2} \frac{d^2 V_b}{d\phi^2} + \frac{1}{r_1} \left(\frac{d}{d\phi} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{r_2}{r_1} \cot\phi \right) \frac{dV_b}{d\phi} - \frac{1}{r_1} \left(\frac{D_{12}}{D_{11}} + \frac{D_{22}}{D_{11}} \frac{r_1}{r_2} \cot^2\phi \right) V_b = -\frac{Y_b}{D_{11}} \end{aligned} \quad (a-11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{r_2}{r_1^2} \frac{d^2 Y_b}{d\phi^2} + \frac{1}{r_1} \frac{dY_b}{d\phi} \left(\frac{d}{d\phi} \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{r_2}{r_1} \cot\phi \right) - \frac{Y_b}{r_1} \left(\frac{r_1 A_{22}}{r_2 A_{11}} \cot^2\phi - \frac{A_{12}}{A_{11}} \right) = (A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}}) V_b \end{aligned} \quad (b-11)$$

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{1}{r_1} \left(\frac{dv}{d\phi} - \omega \right) \quad (a-3)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{1}{r_2} (v \cot\phi - \omega) \quad (b-3)$$

$$\gamma_{\phi\theta} = 0 \quad (c-3)$$

$$\chi_{\phi} = \frac{1}{r_1} \frac{d}{d\phi} \left(\frac{v}{r_1} + \frac{d\omega}{r_1 d\phi} \right) \quad (d-3)$$

$$\chi_{\theta} = \frac{1}{r_2} \left(\frac{v}{r_1} + \frac{d\omega}{r_1 d\phi} \right) \cot\phi \quad (e-3)$$

$$\chi_{\phi\theta} = 0 \quad (f-3)$$

$$r_0 = r_2 \sin\phi \quad (g-3)$$

ω جابجایی در راستای عمود بر پوسته، v جابجایی در راستای نصف‌النهار، ε_{ϕ} کرنش نصف‌النهاری، ε_{θ} کرنش محیطی، $\gamma_{\phi\theta}$ کرنش برشی، χ_{ϕ} انحنا نصف‌النهاری، χ_{θ} انحنا محیطی و r_2 شعاع انحنا هستند. همچنین جابجایی محیطی به دلیل تقارن صفر است. مطابق با قانون هوک و با توجه به $[B_{ij}] = 0$ و روابط (c-3) و (f-3)، نتیجه‌ها طبق روابط (a-4) تا (d-4) به دست خواهند آمد [32].

$$N_{\phi} = A_{11} \varepsilon_{\phi} + A_{12} \varepsilon_{\theta} \quad (a-4)$$

$$N_{\theta} = A_{12} \varepsilon_{\phi} + A_{22} \varepsilon_{\theta} \quad (b-4)$$

$$M_{\phi} = D_{11} \chi_{\phi} + D_{12} \chi_{\theta} \quad (c-4)$$

$$M_{\theta} = D_{12} \chi_{\phi} + D_{22} \chi_{\theta} \quad (d-4)$$

$[A_{ij}]$: کوپلینگ کشش، $[B_{ij}]$: کوپلینگ کشش، خمش و $[D_{ij}]$: کوپلینگ خمش هستند [32].

در ادامه معادلات حاکم بر پوسته دوران‌یافته کامپوزیتی متقارن محوری استخراج می‌گردد. با جایگذاری روابط (a-3) تا (g-3) در روابط (a-4) تا (d-4) نتیجه‌ها بر حسب جابجایی مطابق با روابط (a-5) تا (d-5) به دست خواهند آمد.

$$N_{\phi b} = \frac{A_{11}}{r_1} \left(\frac{dv_b}{d\phi} - \omega_b \right) + \frac{A_{12}}{r_2} (v_b \cot\phi - \omega_b) \quad (a-5)$$

$$N_{\theta b} = \frac{A_{12}}{r_1} \left(\frac{dv_b}{d\phi} - \omega_b \right) + \frac{A_{22}}{r_2} (v_b \cot\phi - \omega_b) \quad (b-5)$$

$$\begin{aligned} M_{\phi b} = & \frac{D_{11}}{r_1} \frac{d}{d\phi} \left(\frac{v_b}{r_1} + \frac{d\omega_b}{r_1 d\phi} \right) + \frac{D_{12}}{r_2} \left(\frac{v_b}{r_1} + \frac{d\omega_b}{r_1 d\phi} \right) \cot\phi \\ & + \frac{D_{22}}{r_2} \frac{d}{d\phi} \left(\frac{v_b}{r_1} + \frac{d\omega_b}{r_1 d\phi} \right) + \frac{D_{22}}{r_2} \left(\frac{v_b}{r_1} + \frac{d\omega_b}{r_1 d\phi} \right) \cot\phi \end{aligned} \quad (c-5)$$

$$\begin{aligned} M_{\theta b} = & \frac{D_{12}}{r_1} \frac{d}{d\phi} \left(\frac{v_b}{r_1} + \frac{d\omega_b}{r_1 d\phi} \right) + \frac{D_{22}}{r_2} \left(\frac{v_b}{r_1} + \frac{d\omega_b}{r_1 d\phi} \right) \cot\phi \\ & + \frac{D_{22}}{r_2} \frac{d}{d\phi} \left(\frac{v_b}{r_1} + \frac{d\omega_b}{r_1 d\phi} \right) + \frac{D_{22}}{r_2} \left(\frac{v_b}{r_1} + \frac{d\omega_b}{r_1 d\phi} \right) \cot\phi \end{aligned} \quad (d-5)$$

اضافه نمودن اندیس b به معادلات جهت معرفی بخش خمشی روابط است. به منظور ساده‌سازی، از تغییر متغیرهای (a-6) و (b-6) معرفی می‌شوند.

$$Q_{\phi bs} = Ce^{-\lambda\psi} \sin(\lambda\psi + \gamma) \quad (a-16)$$

$$\varepsilon_{\theta bs} = \frac{R \sin \phi (N_{\theta bs} - (A_{12} N_{\phi bs} / A_{11}))}{(A_{22} - (A_{12}^2 / A_{11}))} \quad (b-16)$$

$$\begin{aligned} \omega_{bs} &= R \sin \phi \varepsilon_{\theta bs} = \\ &= \frac{R \sin \phi}{(A_{22} - (A_{12}^2 / A_{11}))} \left(N_{\theta bs} - \frac{A_{12}}{A_{11}} N_{\phi bs} \right) \\ &= \frac{R \sin \phi}{(A_{22} - (A_{12}^2 / A_{11}))} \left(\frac{A_{12} Q_{\phi bs} \cot \phi}{A_{11}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{dQ_{\phi bs}}{d\phi} \right) = \\ &= \frac{-R \sin(\alpha - \psi) \lambda \sqrt{2} C e^{-\lambda\psi} \sin(\lambda\psi + \gamma - \frac{\pi}{4})}{(A_{22} - (A_{12}^2 / A_{11}))} \end{aligned} \quad (c-16)$$

$$\begin{aligned} V_{bs} &= \frac{1}{(A_{22} - (A_{12}^2 / A_{11}))} \frac{d^2(Q_{\phi bs})}{d\phi^2} = \\ &= \frac{-2\lambda^2 C e^{-\lambda\psi} \cos(\lambda\psi + \gamma)}{(A_{22} - (A_{12}^2 / A_{11}))} \end{aligned} \quad (d-16)$$

$$\begin{aligned} N_{\phi bs} &= -Q_{\phi bs} \cot \phi = \\ &= -\cot(\alpha - \psi) C e^{-\lambda\psi} \sin(\lambda\psi + \gamma) \end{aligned} \quad (e-16)$$

$$\begin{aligned} N_{\theta bs} &= -\frac{1}{R} \frac{d}{d\phi} (R Q_{\phi bs}) = -\frac{dQ_{\phi bs}}{d\phi} = \\ &= -\frac{dQ_{\phi bs}}{d\psi} \frac{d\psi}{d\phi} = \\ &= -\lambda \sqrt{2} C e^{-\lambda\psi} \sin(\lambda\psi + \gamma - \frac{\pi}{4}) \end{aligned} \quad (f-16)$$

$$\begin{aligned} M_{\phi bs} &= \frac{D_{11}}{r_1} \frac{dV_{bs}}{d\phi} + \frac{D_{12}}{r_2} V_{bs} \cot \phi = \\ &= \frac{D_{11}}{R} \frac{dV_{bs}}{d\phi} = \frac{D_{11}}{R} \frac{dV_{bs}}{d\psi} \frac{d\psi}{d\phi} = \\ &= \frac{4D_{11}\lambda^3 C e^{-\lambda\psi} \sin(\lambda\psi + \gamma - \frac{\pi}{4})}{\sqrt{2}R(A_{22} - (A_{12}^2 / A_{11}))} \end{aligned} \quad (g-16)$$

$$\begin{aligned} M_{\theta bs} &= \frac{D_{12}}{D_{11}} M_{\phi bs} = \\ &= \frac{4D_{12}\lambda^3 C e^{-\lambda\psi} \sin(\lambda\psi + \gamma - \frac{\pi}{4})}{\sqrt{2}R(A_{22} - (A_{12}^2 / A_{11}))} \end{aligned} \quad (h-16)$$

$M_{\phi bs}$ ، $N_{\phi bs}$ ، $N_{\theta bs}$ ، $M_{\theta bs}$ ، V_{bs} ، $\varepsilon_{\theta bs}$ ، ω_{bs} ، γ_M ، C و γ از شرایط مرزی شکل 1 به دست خواهند آمد. برای حالت اعمال گشتاور خالص، ثوابت به صورت C_M و γ_M تعریف و از روابط (a-17) و (b-17) به دست خواهند آمد.

$$\begin{aligned} (M_{\phi bsM})_{\phi=\alpha, \psi=0} &= \\ &= \frac{4D_{11}\lambda^3 C_M \sin(\gamma_M + \frac{\pi}{4})}{\sqrt{2}R(A_{22} - (A_{12}^2 / A_{11}))} = M_1 \end{aligned} \quad (a-17)$$

$$(N_{\phi bsM})_{\phi=\alpha, \psi=0} = -\cot \alpha C \sin \gamma_M = 0 \quad (b-17)$$

با صرف نظر از Y_b, V_b ، $\frac{dY_b}{d\phi}$ و $\frac{dV_b}{d\phi}$ به دلیل کوچک بودنشان نسبت به $\frac{d^2V_b}{d\phi^2}$ و $\frac{d^2Y_b}{d\phi^2}$ ، در روابط (a-11) و (b-11)، معادلات حاکم بر پوسته دوران یافته کامپوزیتی متقارن محوری با فرض ضخامت و زاویه لایه چینی ثابت، مطابق با روابط (a-12) و (b-12) به دست خواهند آمد.

$$\frac{r_2}{r_1^2} \frac{d^2V_b}{d\phi^2} = -\frac{Q_{\phi b} r_2}{D_{11}} \quad (a-12)$$

$$\frac{r_2}{r_1^2} \frac{d^2(Q_{\phi b} r_2)}{d\phi^2} = (A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}}) V_b \quad (b-12)$$

با جایگذاری خواص تک لایه همسانگرد با ضخامت h ، مدول الاستیسیته E و نسبت پواسون ν و شعاع‌های انحنای برابر در روابط (a-12) و (b-12) معادلات حاکم بر پوسته دوران یافته همسانگرد متقارن محوری کروی موجود در مرجع [31] به دست خواهند آمد. هر چند اگر هندسه عدسی غیر از کره باشد با توجه به روابط (a-12) و (b-12)، به دلیل تابعیت شعاع انحنای نسبت به زاویه نصف النهاری حل کاملاً تحلیلی وجود ندارد اما با توجه به برخورداری از حجم بالا در عدسی کروی و کم بودن تنش‌ها در پوسته کروی نسبت به دیگر پوسته‌ها، عدسی کروی کاربرد زیادی در مخازن تحت فشار دارد. در ادامه معادلات حاکم بر عدسی کروی استخراج می‌شوند.

1-3- معادلات حاکم بر عدسی کروی کامپوزیتی متقارن محوری

در این بخش معادلات حاکم بر عدسی کروی کامپوزیتی استخراج می‌گردد. در عدسی کروی $r_1 = r_2 = R$ و $\frac{dR}{d\phi} = 0$ است. با فرض عدسی کروی معادلات (a-12) و (b-12) به معادلات (a-13) و (b-13) تبدیل می‌شوند.

$$\frac{d^4(Q_{\phi bs})}{d\phi^4} + 4\lambda^4 Q_{\phi bs} = 0 \quad (a-13)$$

$$4\lambda^4 = \frac{R^2}{D_{11}} \left(A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right) \quad (b-13)$$

اضافه نمودن اندیس bs به معادلات جهت معرفی بخش خمشی روابط در پوسته کروی است. $Q_{\phi bs}$ ، $N_{\phi bs}$ ، $N_{\theta bs}$ ، $M_{\phi bs}$ ، $M_{\theta bs}$ ، V_{bs} ، $\varepsilon_{\theta bs}$ ، ω_{bs} ، γ_M ، C و γ از شرایط مرزی شکل 1 به دست خواهند آمد. حل معادله (a-13) در رابطه (14) ارائه شده است.

$$\begin{aligned} Q_{\phi bs} &= C_1 e^{\lambda\phi} \cos \lambda\phi + C_2 e^{\lambda\phi} \sin \lambda\phi + \\ &+ C_3 e^{-\lambda\phi} \cos \lambda\phi + C_4 e^{-\lambda\phi} \sin \lambda\phi \end{aligned} \quad (14)$$

برای حالتی که عدسی سوراخ ندارد رابطه (14) به رابطه (15) تبدیل می‌شود.

$$Q_{\phi bs} = C_1 e^{\lambda\phi} \cos \lambda\phi + C_2 e^{\lambda\phi} \sin \lambda\phi \quad (15)$$

حذف بخش دارای ضرایب C_3 و C_4 به دلیل افزایشی بودن نیروی برشی با افزایش ϕ (نزدیک شدن به موقعیت تقاطع عدسی کروی و استوانه) است. به منظور ساده‌سازی با استفاده از تغییر متغیر $\phi + \psi = \alpha$ و معادلات (b-3)، (a-5) تا (d-5)، (8)، (9)، (a-12) و (15) نتیجه‌ها، جایجایی عمود بر پوسته و چرخش برای عدسی کروی بر حسب ثوابت مطابق با روابط (a-16) تا (h-16) به دست خواهند آمد.

V_{bsQ} چرخش ناشی از بار برشی خالص و ω_{bsQ} جابجایی عمود بر پوسته ناشی از بار برشی خالص است. با جایگذاری ثوابت C_Q و γ_Q به دست آمده از رابطه (a-21) و (b-22) در روابط (e-16) تا (h-16)، نیروی برشی و نتیجه‌های نیرو و گشتاور در عدسی کروی و در بارگذاری نیروی برشی خالص به دست خواهند آمد. جواب نهایی جابجایی، چرخش، نیروی برشی و نتیجه‌های نیرو و گشتاور حاصل برهم نهش حالت‌های اعمال گشتاور خالص و نیروی برشی خالص است. جابجایی غشایی شعاعی ناشی از فشار داخلی برای کره در تقاطع عدسی و استوانه ($\psi = 0$) با استفاده از رابطه (c-16) مطابق با رابطه (23) به دست خواهد آمد.

$$\omega_{ms} = R \sin \phi \varepsilon_{\theta ms} = \frac{R \sin \alpha \left(N_{\theta ms} - \left(\frac{A_{12} N_{\phi ms}}{A_{11}} \right) \right)}{(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} = \frac{p R^2 \sin \alpha}{2(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \left(1 - \frac{A_{12}}{A_{11}} \right) \quad (23)$$

ω_{ms} جابجایی غشایی عمود بر پوسته، $\varepsilon_{\theta ms}$ کرنش غشایی در راستای محیطی، $N_{\theta ms}$ نتیجه نیروی غشایی در راستای محیطی و $N_{\phi ms}$ نتیجه نیروی غشایی در راستای نصف‌النهاری در عدسی کروی ناشی از فشار داخلی هستند.

2-3- استفاده از معادلات حاکم بر استوانه کامپوزیتی متقارن محوری [15]
در این بخش از معادلات حاکم در پوسته استوانه کامپوزیتی متقارن محوری استفاده می‌شود. این معادلات در روابط (a-24) تا (f-24) ارائه شده‌اند [15].

$$\omega_{bc} = \frac{-e^{-\beta x}}{2\beta^3 D_{11}} (\beta M_0 (\sin \beta x - \cos \beta x) - Q_0 \cos \beta x) \quad (a-24)$$

$$V_{bc} = \frac{e^{-\beta x}}{2\beta^2 D_{11}} (2\beta M_0 \cos \beta x + Q_0 (\cos \beta x + \sin \beta x)) \quad (b-24)$$

$$N_{\theta bc} = \left(A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right) \frac{e^{-\beta x}}{2R\beta^3 D_{11}} (\beta M_0 (\sin \beta x - \cos \beta x) - Q_0 \cos \beta x) \quad (c-24)$$

$$M_{x bc} = \frac{e^{-\beta x}}{\beta} (\beta M_0 (\sin \beta x + \cos \beta x) + Q_0 \sin \beta x) \quad (d-24)$$

$$M_{\theta bc} = \frac{D_{12}}{D_{11}} \frac{e^{-\beta x}}{\beta} (\beta M_0 (\sin \beta x + \cos \beta x) + Q_0 \sin \beta x) \quad (e-24)$$

$$Q_{x bc} = e^{-\beta x} (Q_0 (\cos \beta x - \sin \beta x) - 2\beta M_0 \sin \beta x) \quad (f-24)$$

$$\omega_{mc} = \frac{p R^2}{2(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \left(2 - \frac{A_{12}}{A_{11}} \right) \quad (g-24)$$

ω_{bc} جابجایی در راستای عمود بر پوسته ناشی از بار خمشی، V_{bc} چرخش نصف‌النهاری ناشی از بارهای خمشی، $N_{\theta bc}$ نتیجه نیروی محیطی، $M_{x bc}$ نتیجه گشتاور طولی، $M_{\theta bc}$ نتیجه گشتاور محیطی ناشی از بار خمشی، $Q_{x bc}$ نتیجه نیروی برشی طولی ناشی از بارهای خمشی، ω_{mc} جابجایی در راستای عمود بر پوسته در اثر فشار داخلی، Q_0 و M_0 نتیجه‌های نیروی برشی و گشتاور خمشی در تقاطع دو پوسته هستند.

$M_{\phi bsm}$ نتیجه گشتاور نصف‌النهاری در اثر بار خمشی گشتاور و $N_{\phi bsm}$ نتیجه نیروی نصف‌النهاری در اثر بار خمشی گشتاور هستند. با استفاده از روابط (a-17) و (b-17)، ثوابت C_M و γ_M مطابق با روابط (a-18) و (b-18)، به دست خواهند آمد.

$$\gamma_M = 0 \quad (a-18)$$

$$C_M = \frac{R M_1 (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))}{2 D_{11} \lambda^3} \quad (b-18)$$

برای حالت اعمال گشتاور خالص و با استفاده از روابط (c-16)، (d-16)، (a-18) و (b-18)، در $\psi = 0$ و $\phi = \alpha$ ، چرخش و جابجایی عمود بر پوسته مطابق با روابط (a-19) و (b-19) به دست خواهند آمد.

$$V_{bsM} = \frac{R M_1}{D_{11} \lambda} \quad (a-19)$$

$$\omega_{bsM} = \frac{R^2 \sin \alpha}{2 D_{11} \lambda^2} M_1 \quad (b-19)$$

V_{bsM} چرخش ناشی از بار خمشی خالص و ω_{bsM} جابجایی عمود بر پوسته ناشی از بار خمشی خالص است. با جایگذاری ثوابت C_M و γ_M به دست آمده از روابط (a-18) و (b-18) در روابط (e-16) تا (h-16)، نیروی برشی و نتیجه‌های نیرو و گشتاور در عدسی کروی و در بارگذاری گشتاور خالص به دست خواهند آمد. برای حالت اعمال نیروی برشی خالص، ثوابت به صورت C_Q و γ_Q تعریف و از روابط (a-20) و (b-20) به دست خواهند آمد.

$$(M_{\phi bsQ})_{\phi=\alpha, \psi=0} = \frac{4 D_{11} \lambda^3 C_Q \sin(\gamma_Q + \pi/4)}{\sqrt{2} R (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} = 0 \quad (a-20)$$

$$(N_{\phi bsQ})_{\phi=\alpha, \psi=0} = -\cot \alpha C_Q \sin \gamma_Q = -Q_1 \cos \alpha \quad (b-20)$$

$M_{\phi bsQ}$ نتیجه گشتاور نصف‌النهاری در اثر بار برشی و $N_{\phi bsQ}$ نتیجه نیروی نصف‌النهاری در اثر بار برشی هستند. با استفاده از روابط (a-20) و همچنین (b-20)، ثوابت C_Q و γ_Q مطابق با روابط (a-21) و (b-21) به دست خواهند آمد.

$$\gamma_Q = \frac{-\pi}{4} \quad (a-21)$$

$$C_Q = \frac{-2 Q_1 \sin \alpha}{\sqrt{2}} \quad (b-21)$$

برای بررسی حالت اعمال نیروی برشی خالص و همچنین با استفاده از روابط (c-16)، (d-16)، (a-21) و (b-21) در $\psi = 0$ و $\phi = \alpha$ ، چرخش و جابجایی عمود بر پوسته مطابق با روابط (a-22) و (b-22) به دست خواهند آمد.

$$V_{bsQ} = \frac{2 Q_1}{(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \lambda^2 \sin \alpha \quad (a-22)$$

$$\omega_{bsQ} = \frac{-2 R \sin^2 \alpha}{(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \lambda Q_1 \quad (b-22)$$

$$\frac{D_{12} e^{-\beta x}}{D_{11} \beta} \frac{-pR^2 \sin \beta x}{4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11})) (1/\beta^3 D_{11})}$$

$$N_{\theta tc} = N_{\theta bc} + N_{\theta mc} = \left(\left(A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right) \frac{e^{-\beta x}}{2R\beta^3 D_{11}} \times \frac{-pR^2 \cos \beta x}{4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11})) (1/\beta^3 D_{11})} \right) + pR \quad (d-28)$$

$$N_{xtc} = N_{xbc} + N_{xmc} = \frac{pR}{2} \quad (e-28)$$

$$M_{x\theta tc} = N_{x\theta tc} = 0 \quad (f-28)$$

ω_{tc} جابجایی کل عمود بر پوسته، M_{xtc} منته گشتاور کل در راستای طولی، M_{xmc} منته گشتاور طولی ناشی از بار غشایی، $M_{\theta tc}$ منته گشتاور کل در راستای محیطی، $M_{\theta mc}$ منته گشتاور محیطی ناشی از بار غشایی، $N_{\theta tc}$ منته نیروی کل در راستای محیطی، N_{xtc} منته نیروی کل در راستای طولی، N_{xmc} منته نیروی غشایی در راستای طولی، $M_{x\theta tc}$ و $N_{x\theta tc}$ منته‌های گشتاور و نیروی برشی کل هستند. ماتریس‌های انحنا و کرنش سطح میانی در استوانه کامپوزیتی با فرض تقارن محوری با استفاده از روابط (b-28) تا (f-28) و روابط (a-29) و (b-29) به دست خواهند آمد [32].

$$\begin{bmatrix} N_{xtc} \\ N_{\theta tc} \\ N_{x\theta tc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} A_{12} A_{16} \\ A_{12} A_{22} A_{26} \\ A_{16} A_{26} A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_{xc} \\ \epsilon_{\theta c} \\ 2\epsilon_{x\theta c} \end{pmatrix} \quad (a-29)$$

$$\begin{bmatrix} M_{xtc} \\ M_{\theta tc} \\ M_{x\theta tc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} D_{12} D_{16} \\ D_{12} D_{22} D_{26} \\ D_{16} D_{26} D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \kappa_{xc} \\ \kappa_{\theta c} \\ \kappa_{x\theta c} \end{pmatrix} \quad (b-29)$$

$[k]_c$ و $[E]_c$ ماتریس‌های انحنا و کرنش سطح میانی در پوسته استوانه‌ای هستند. تنش‌های صفحه‌ای استوانه در راستاهای طولی و محیطی برای لایه k ام مطابق با رابطه (30) به دست می‌آیند [32].

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xc} \\ \sigma_{\theta c} \\ \tau_{x\theta c} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \begin{pmatrix} \epsilon_{xc} \\ \epsilon_{\theta c} \\ 2\epsilon_{x\theta c} \end{pmatrix} + Z \begin{pmatrix} \kappa_{xc} \\ \kappa_{\theta c} \\ \kappa_{x\theta c} \end{pmatrix} \right\} \quad (30)$$

Z فاصله از سطح میانی و $[\bar{Q}_{ij}]$ ماتریس سفتی می‌باشد.

6-3- تنش‌های طولی و محیطی در هر لایه از عدسی کروی

جابجایی و منته‌های نیرویی و گشتاور در عدسی کروی کامپوزیتی در $\alpha = \frac{\pi}{2}$ و همچنین با استفاده از روابط (e-16) تا (h-16)، (a-18)، (b-18)، (b-19)، (a-21)، (b-21)، (b-22)، (23)، (a-27) و (b-27) از روابط (a-31) تا (f-31) استخراج می‌شوند.

$$\omega_{ts} = \omega_{ms} + \omega_{bs} = \omega_{ms} + \omega_{bsQ} + \omega_{bsM} = \omega_{ms} + \omega_{bsQ} = \frac{pR^2}{2(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \left(1 - \frac{A_{12}}{A_{11}} \right) - \frac{\lambda e^{-\lambda \psi} 2pR^3 \sin(\pi/2 - \psi)}{(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11})) \sin(\lambda \psi - \pi/2)} \times \frac{1}{(4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11})) (1/\beta^3 D_{11}))} \quad (a-31)$$

3-3- اعمال روابط سازگاری جابجایی و چرخش در تقاطع دو پوسته [31]

با توجه به شکل 1 و با استفاده از اصل تعادل، نیروها و گشتاورها مطابق با روابط (a-25) و (b-25) در تقاطع به دست خواهند آمد.

$$\sum M = 0 \longrightarrow M_0 = M_1 \quad (a-25)$$

$$\sum Q = 0 \longrightarrow Q_0 = Q_1 \quad (b-25)$$

برای به دست آوردن نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی در تقاطع دو پوسته از روابط سازگاری جابجایی و چرخش باید استفاده نمود. این روابط در محل تقاطع عدسی کروی و استوانه مطابق با روابط (a-26) و (b-26) است [31].

$$\omega_{ms} + \omega_{bsQ} + \omega_{bsM} = \omega_{mc} + \omega_{bc} \quad (a-26)$$

$$V_{ms} + V_{bsQ} + V_{bsM} = V_{mc} + V_{bc} \quad (b-26)$$

V_{ms} چرخش ناشی از بار غشایی در پوسته کروی و V_{mc} چرخش ناشی از بار غشایی در پوسته استوانه‌ای است.

4-3- استخراج نیروهای برشی و گشتاورهای خمشی در تقاطع دو پوسته

در مرور منابع بخش 1 بیان شد که نیروهای به دست آمده در تقاطع دو پوسته با فرض جایگزینی پوسته عدسی با پوسته استوانه‌ای به دست آمده‌اند. اما در این بخش نیروی برشی و گشتاور خمشی بدون این ساده‌سازی و در تقاطع دو پوسته کروی و استوانه‌ای به دست خواهند آمد. در ادامه این بخش با جایگذاری روابط (a-19)، (b-19)، (a-22)، (b-22)، (23)، (a-24)، (b-24) و (g-24) در روابط (a-26) و (b-26) در $\alpha = \frac{\pi}{2}$ و $x = 0$ و همچنین با استفاده از روابط $V_{mc} = 0$ و $V_{ms} = 0$ نیروی برشی و گشتاور خمشی در تقاطع دو پوسته از روابط (a-27) و (b-27) به دست خواهند آمد.

$$Q_1 = \frac{-pR^2}{4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11})) (1/\beta^3 D_{11})} \quad (a-27)$$

$$M_1 = 0 \quad (b-27)$$

5-3- تنش‌های طولی و محیطی در هر لایه از استوانه

جابجایی و منته‌های نیرو و گشتاور کل در استوانه کامپوزیتی که حاصل جمع مؤلفه‌های غشایی و خمشی است در زاویه $\alpha = \frac{\pi}{2}$ و با استفاده از روابط (a-24)، (c-24)، (d-24)، (e-24)، (g-24)، (a-25)، (b-25)، (a-27) و (b-27) مطابق روابط (a-28) تا (f-28) استخراج می‌شوند.

$$\omega_{tc} = \omega_{mc} + \omega_{bc} = \frac{pR^2}{2(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \left(2 - \frac{A_{12}}{A_{11}} \right) + \frac{e^{-\beta x}}{pR^2 \cos \beta x} \frac{1}{2\beta^3 D_{11} 4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11})) (1/\beta^3 D_{11})} \quad (a-28)$$

$$M_{xtc} = M_{xmc} + M_{xbc} = M_{xbc} = D_{11} \frac{d^2 \omega_{bc}}{dx^2} = \frac{e^{-\beta x}}{\beta} \frac{-pR^2 \sin \beta x}{4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11})) (1/\beta^3 D_{11})} \quad (b-28)$$

$$M_{\theta tc} = M_{\theta mc} + M_{\theta bc} = M_{\theta bc} = D_{12} \frac{d^2 \omega_{tc}}{dx^2} = \quad (c-28)$$

در بخش 3 با نتایج حل عددی در بخش 4 مقایسه گردیده است. در ادامه حل عددی بیان می‌گردد.

4- حل عددی

حل عددی با استفاده از روش اجزاء محدود و بهره‌گیری از نرم‌افزار انسیس انجام شده است. در ادامه مراحل این حل عددی شرح داده خواهد شد.

4-1- خواص مکانیکی

کامپوزیت استفاده شده کربن/اپوکسی است و خواص تک لایه آن در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی تک لایه کامپوزیتی کربن / اپوکسی

Table. 1 Mechanical properties of carbon/epoxy composite layer [33]

خواص مکانیکی	واحد	مقدار
مدول کششی	$E_{22}, E_{11}(GPa)$	10, 130
مدول برشی	$G_{12}(GPa)$	4.5
نسبت پواسون	ν_{12}	0.28

4-2- مشخصات هندسی مخزن و بارگذاری

مشخصات هندسی مخزن و بار اعمالی در جدول 2 آورده شده است.

جدول 2 مشخصات هندسی و بارگذاری اعمالی به مخزن کامپوزیتی

Table. 2 Geometric specifications and loading applied to composite vessel

مشخصات هندسی و بارگذاری مخزن	واحد	مقدار
طول پوسته استوانه	$l(m)$	0.6
شعاع مخزن	$R(m)$	0.25
فشار مخزن	$p(MPa)$	40
ضخامت تک لایه	$t(mm)$	0.27

4-3- تعداد و زوایای لایه‌چینی

در این مقاله سه نوع لایه‌چینی $(\pm 15)_s$ ، $(\pm 30)_s$ و $(\pm 55)_s$ بررسی شده است. در هر کدام از این لایه‌چینی‌ها از 4 لایه به صورت متقارن نسبت به سطح میانی استفاده شده است. چینش لایه‌ها و زوایای لایه‌چینی $(\pm 15)_s$ در شکل 3 نشان داده شده است.

Outer Layer
+15
-15
-15
+15
Inner Layer

Fig. 3 Layering arrangement and angles $(\pm 15)_s$

شکل 3 چینش و زوایای لایه‌چینی $(\pm 15)_s$

در مدل‌سازی، لایه‌ها به هم چسبیده‌اند و روی هم سر نمی‌خورند.

$$M_{\phi tbs} = M_{\phi bsm} + M_{\phi bsq} = M_{\phi bsq} = \frac{4pRD_{11}\lambda^3 e^{-\lambda\psi} \sin \lambda\psi}{(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \times \frac{1}{(4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))(1/\beta^3 D_{11}))} \quad (b-31)$$

$$M_{\theta tbs} = M_{\theta bsm} + M_{\theta bsq} = M_{\theta bsq} = \frac{4pRD_{12}\lambda^3 e^{-\lambda\psi} \sin \lambda\psi}{(A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))} \times \frac{1}{(4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))(1/\beta^3 D_{11}))} \quad (c-31)$$

$$N_{\theta ts} = N_{\theta bs} + N_{\theta ms} = N_{\theta bsq} + N_{\theta bsm} + N_{\theta ms} = N_{\theta bsq} + N_{\theta ms} = \frac{-2p\lambda R^2 e^{-\lambda\psi} \sin(\lambda\psi - \pi/2)}{4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))(1/\beta^3 D_{11})} + \frac{pR}{2} \quad (d-31)$$

$$N_{\phi ts} = N_{\phi bs} + N_{\phi ms} = N_{\phi bsq} + N_{\phi bsm} + N_{\phi ms} = N_{\phi bsq} + N_{\phi ms} = \frac{-\sqrt{2}\cot(\pi/2 - \psi)pR^2 e^{-\lambda\psi} \sin(\lambda\psi - \pi/4)}{4R\lambda + (A_{22} - (A_{12}^2/A_{11}))(1/\beta^3 D_{11})} + \frac{pR}{2} \quad (e-31)$$

$$M_{\phi \theta ts} = N_{\phi \theta ts} = 0 \quad (f-31)$$

ω_{ts} جابجایی کل عمود بر پوسته، $M_{\phi tbs}$ منته‌ج گشتاور کل در راستای نصف‌النهاری، $M_{\theta tbs}$ منته‌ج گشتاور کل در راستای محیطی، $M_{\phi bsm}$ منته‌ج گشتاور محیطی در اثر بار خمشی گشتاور، $M_{\theta bsq}$ منته‌ج گشتاور محیطی در اثر بار برشی، $N_{\theta ts}$ منته‌ج نیروی کل در راستای محیطی، $N_{\theta bsm}$ منته‌ج نیروی محیطی در اثر بار خمشی گشتاور، $N_{\theta bsq}$ منته‌ج نیروی محیطی در اثر بار برشی، $N_{\phi tc}$ منته‌ج نیروی کل در راستای نصف‌النهاری، $M_{\phi \theta tc}$ و $N_{\phi \theta tc}$ منته‌ج‌های گشتاور و نیروی برشی کل هستند. ماتریس‌های انحنا و کرنش سطح میانی در عدسی کروی با فرض تقارن محوری با استفاده از روابط (b-31) تا (f-31) و همچنین (a-32) و (b-32) به دست خواهند آمد [32].

$$\begin{bmatrix} N_{\phi ts} \\ N_{\theta ts} \\ N_{\phi \theta ts} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}A_{12}A_{16} \\ A_{12}A_{22}A_{26} \\ A_{16}A_{26}A_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_{\phi s} \\ \dot{\epsilon}_{\theta s} \\ 2\dot{\epsilon}_{\phi \theta s} \end{pmatrix} \quad (a-32)$$

$$\begin{bmatrix} M_{\phi ts} \\ M_{\theta ts} \\ M_{\phi \theta ts} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}D_{12}D_{16} \\ D_{12}D_{22}D_{26} \\ D_{16}D_{26}D_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_{\phi s} \\ k_{\theta s} \\ k_{\phi \theta s} \end{pmatrix} \quad (b-32)$$

$[k]_s$ و $[\dot{\epsilon}]_s$ ماتریس‌های انحنا و کرنش سطح میانی در پوسته کروی هستند. تنش‌های صفحه‌ای عدسی کروی در راستاهای نصف‌النهاری و محیطی برای لایه k ام مطابق با رابطه (33) به دست می‌آیند [32].

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\phi s} \\ \sigma_{\theta s} \\ \tau_{\phi \theta s} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \begin{pmatrix} \dot{\epsilon}_{\phi s} \\ \dot{\epsilon}_{\theta s} \\ 2\dot{\epsilon}_{\phi \theta s} \end{pmatrix} + Z \begin{pmatrix} k_{\phi s} \\ k_{\theta s} \\ k_{\phi \theta s} \end{pmatrix} \right\} \quad (33)$$

در این مقاله به دلیل مقادیر بالاتر و اهمیت بیشتر تنش‌های نرمال درون صفحه نسبت به تنش برشی درون صفحه، فقط تنش‌های نرمال به دست آمده‌اند. روابط تحلیلی بیان شده در قالب کد متلب نوشته شد و نتایج حاصل از کد متلب

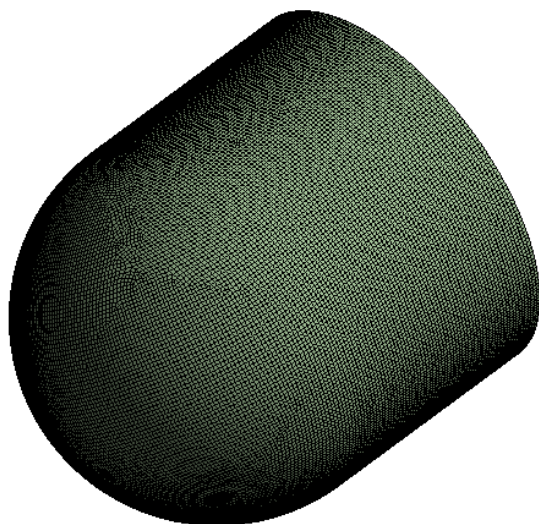


Fig. 5 Sector meshing using shell element

شکل 5 شبکه‌بندی با استفاده از المان پوسته

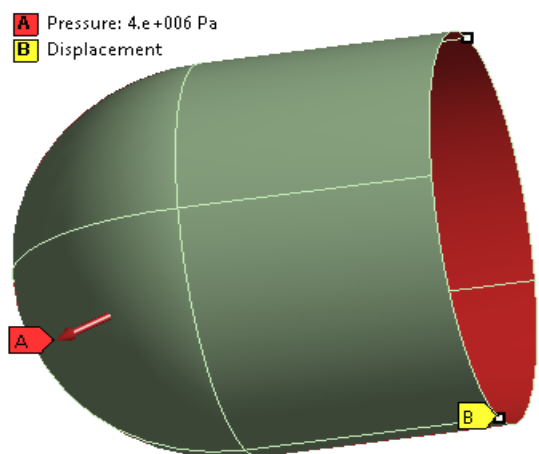


Fig. 6 Boundary conditions and internal pressure loading

شکل 6 شرایط مرزی و بارگذاری فشار داخلی

7-4- همگرایی شبکه

به منظور اطمینان از نتایج حل عددی حساسیت نتایج به تعداد شبکه بررسی شده است. این همگرایی شبکه برای بیشینه تنش طولی روی پوسته استوانه‌ای در سطح پائینی لایه 15+ درجه داخلی در شکل 7 آورده شده است.

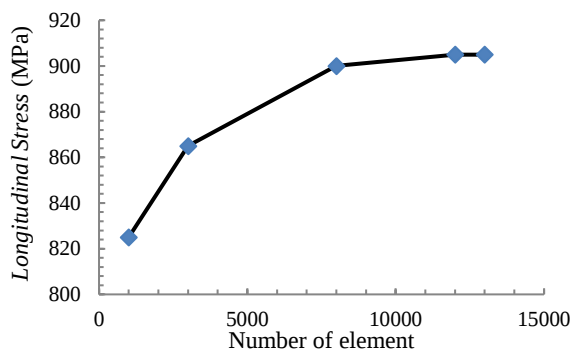


Fig. 7 Convergence of the finite element result of the maximum longitudinal stress on the cylindrical shell

شکل 7 همگرایی نتایج اجزاء محدود بیشینه تنش طولی روی پوسته استوانه‌ای در سطح پائینی لایه 15+ داخلی

4-4- مدل‌سازی

با توجه به متقارن بودن هندسه، خواص مواد، بارگذاری و لایه‌چینی متقارن نسبت به راستای طولی، نصف مخزن در راستای طولی مدل شده است. مسیری که نتایج حل عددی از آن استخراج شده‌اند از نقطه 1 که مبدأ مختصات روی آن واقع شده است به نقطه 2 که مرکز کره روی آن واقع شده است امتداد دارد. این مسیر در پوسته استوانه‌ای در راستای طولی و در پوسته کروی در راستای نصف‌النهار است. مدل و مسیر معرفی شده در شکل 4 نشان داده شده است.

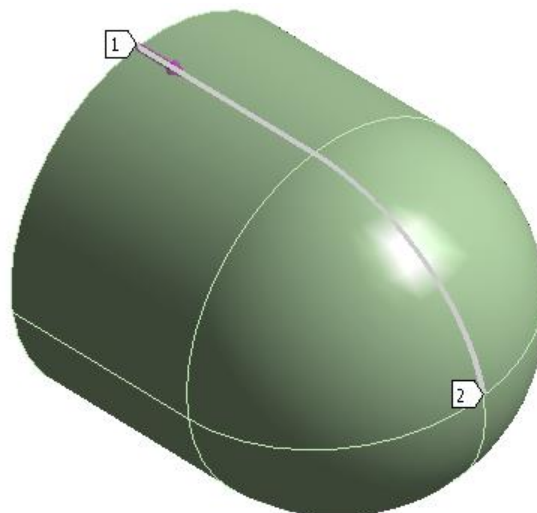


Fig. 4 The chosen path of presenting analytical and numerical results

شکل 4 مسیر انتخابی ارائه نتایج تحلیلی و عددی

همان‌گونه که در شکل 4 مشخص است مخزن دارای سوراخ به منظور اتصال فلنج نیست. در مخازن گاز یک طرف مخزن تحت فشار بسته است و در طرف دیگر که مخصوص تزریق گاز است از بوشی استفاده می‌شود که گشودگی این بوش نسبت به قطر مخزن مقدار کوچکی است و در این مقاله به دلیل کوچک بودن قطر بوش، فرضی ساده‌سازی انجام شده و از آن صرف‌نظر شده است. با صرف‌نظر از این سوراخ در شکل 4 و در نقطه شماره 2 پیچش به صورت قطبی است. همچنین روی پوسته استوانه‌ای و عدسی کروی از پیچش ژئودزیک استفاده شده است در این نوع پیچش، الیاف در کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه پیچیده می‌شوند و سرخوردگی وجود ندارد. در پیچش ژئودزیک تغییرات کرنش در راستای الیاف وجود ندارد و در نتیجه تنش در راستای الیاف ثابت باقی می‌ماند. هندسه عدسی، تغییر زاویه الیاف و توزیع ضخامت در بخش استوانه و عدسی با استفاده از روابط مرجع [17] به دست آمده و روابط حاصله کدنویسی شده و با استفاده از نرم‌افزار طراحی مخزن کامپوزیتی ProWind، مدل اجزاء محدود به عنوان ورودی به محیط ACP(pre) انسیس وارد می‌شود.

5-4- شبکه‌بندی

المان استفاده شده در حل عددی مخزن جدار نازک کامپوزیتی، shell 181 است این المان دارای 4 گره و هر گره دارای 6 درجه آزادی است. شبکه‌بندی با استفاده از المان پوسته در شکل 5 نشان داده شده است.

6-4- شرایط مرزی و اعمال بارگذاری

شرایط مرزی در راستای طولی از نوع متقارن است در این شرط مرزی جابجایی‌های عمود بر صفحه، صفر در نظر گرفته شده است. بار اعمال شده نیز به صورت فشار داخلی است. نحوه اعمال شرایط مرزی و بارگذاری فشار داخلی در شکل 6 نشان داده شده است.

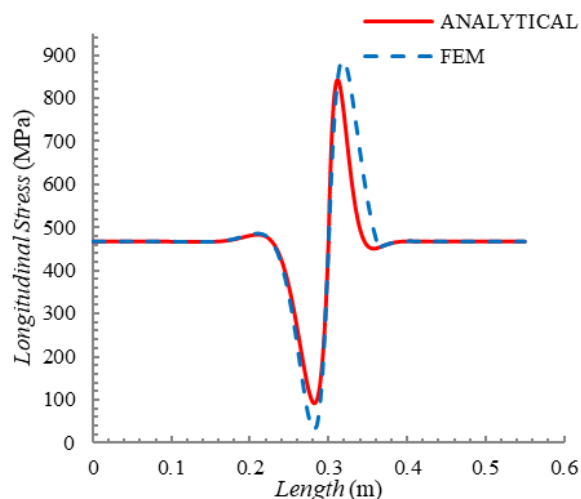


Fig. 10 Longitudinal stress on the upper surface +15 outside

شکل 10 تنش طولی در سطح بالایی +15 بیرونی

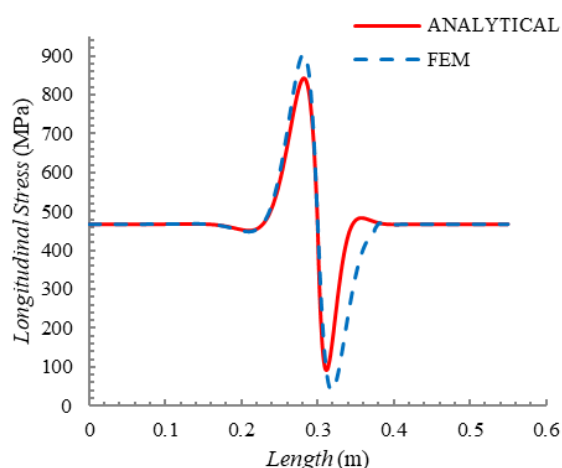


Fig. 11 Longitudinal stress at the lower surface +15 internal

شکل 11 تنش طولی در سطح پائینی +15 داخلی

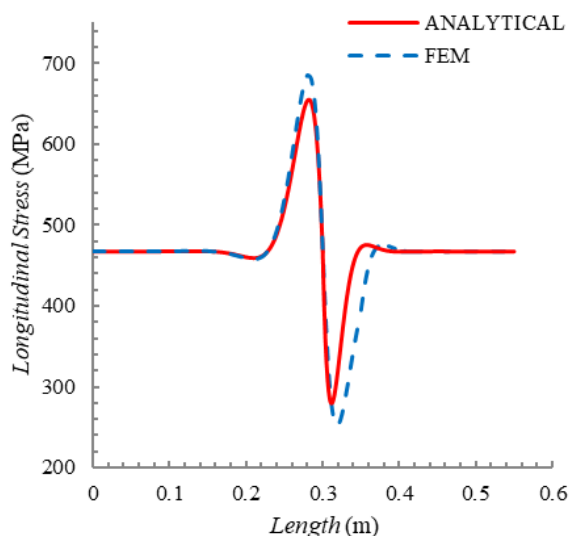


Fig. 12 Longitudinal stress on the upper surface +15 internal

شکل 12 تنش طولی در سطح بالایی +15 داخلی

8-4- نتایج
حل عددی برای لایه‌چینی‌های $s(15\pm)$ ، $s(30\pm)$ و $s(55\pm)$ انجام شده است و نتایج تنش‌های طولی و محیطی در لایه‌های مختلف به دست آمده است. در این بخش به عنوان نمونه نتایج تحلیل تنش محیطی در سطح بالایی لایه +15 بیرونی در شکل 8 نشان داده شده است.

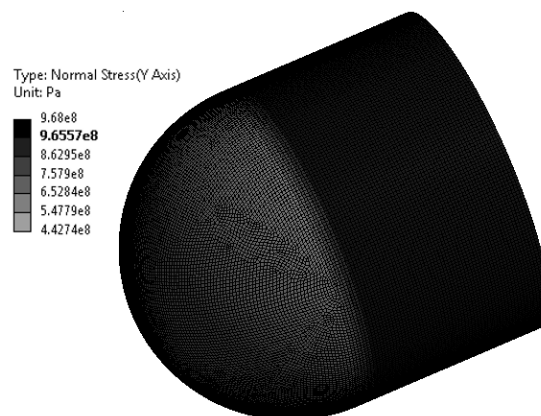


Fig. 8 Circumferential stress distribution on the upper surface of the outer +15 layer

شکل 8 توزیع تنش محیطی در سطح بالایی لایه +15 بیرونی

در ادامه نتایج حل تحلیلی با استفاده از کد متلب و حل عددی با استفاده از نرم‌افزار انسیس با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

5- تحلیل نتایج

در این بخش به منظور صحت سنجی نتایج به دست آمده از حل تحلیلی، نتایج حل تحلیلی نوشته شده در قالب کد متلب با نتایج به دست آمده از حل عددی به دست آمده از نرم‌افزار اجزاء محدود انسیس برای لایه‌چینی‌های $s(15\pm)$ ، $s(30\pm)$ و $s(55\pm)$ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج شامل تنش‌های طولی و محیطی در راستای مسیر نشان داده شده در شکل 4 هستند.

5-1- مقایسه نتایج تحلیلی و عددی در لایه‌چینی متقارن $s(15\pm)$
در این قسمت تنش‌های طولی و محیطی برای لایه‌چینی متقارن $s(15\pm)$ درجه به دست آمده از حل‌های تحلیلی و عددی در شکل‌های 9 تا 15، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

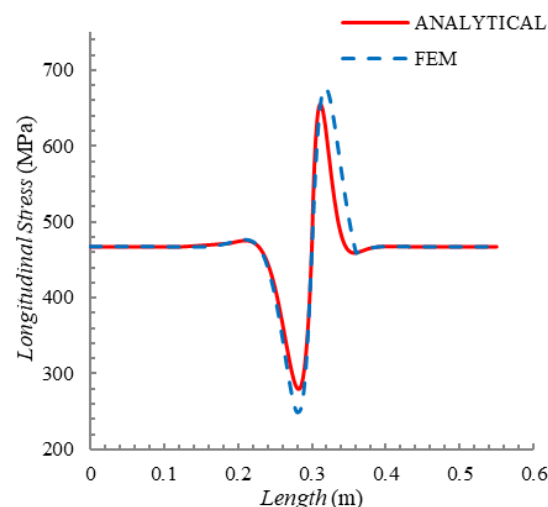


Fig. 9 Longitudinal stress at the lower surface +15 outside

شکل 9 تنش طولی در سطح پائینی +15 بیرونی

همان‌طور که در شکل‌های 9 تا 14 قابل مشاهده است در ناحیه اتصال پوسته کروی و پوسته استوانه‌ای علاوه بر تنش‌های غشایی، به دلیل ناهمگونی هندسی تنش‌های خمشی نیز وجود دارند. وجود این تنش‌ها موجب افزایش تنش‌های محیطی و طولی در موقعیت اتصال می‌شوند. مقادیر تنش‌های طولی دور از موقعیت اتصال دو پوسته حالت غشایی دارند و این مقادیر تنش در پوسته‌های استوانه‌ای و کروی با یکدیگر برابر هستند و این به دلیل عدم تابعت تنش‌های غشایی نسبت به فاصله از سطح میانی است. همچنین مقادیر تنش‌های محیطی دور از موقعیت اتصال دو پوسته نیز حالت غشایی دارند و این مقادیر تنش در پوسته استوانه‌ای 2 برابر تنش غشایی محیطی در پوسته کروی است و این با تئوری پوسته‌های جدار نازک تحت فشار مطابقت دارد. همان‌طور که در شکل 15 مشخص است مقادیر تنش‌های طولی به دست آمده از حل تحلیلی در سطح پایینی +15 درجه داخلی و سطح بالایی +15 درجه بیرونی از نظر علامت، قرینه یکدیگر هستند و این به دلیل متقارن بودن این لایه‌ها نسبت به سطح میانی است. نسبت تنش‌ها در بیشینه مقدار به تنش غشایی به عنوان ضریب تمرکز تنش معرفی می‌شود. این ضریب در لایه‌هایی که دارای زاویه متفاوت لایه‌چینی یا فواصل مختلف از سطح میانی هستند، مقادیر متفاوتی را به خود تخصیص می‌دهد. ضریب تمرکز تنش‌های طولی و محیطی در دورترین لایه‌ها که بیشترین مقادیر را به خود تخصیص می‌دهند برای لایه‌چینی $s(\pm 15)$ در حل‌های تحلیلی و عددی و همچنین موقعیت وقوع تنش‌های بیشینه در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3 تنش‌های طولی و محیطی بیشینه در لایه‌چینی $s(\pm 15)$

Table 3 Maximum longitudinal and circumferential stresses in layering $s(\pm 15)$					
نوع تنش	ضریب تمرکز تنش	تحلیلی	عددی	نوع لایه	فاصله طولی از موقعیت اتصال (mm)
					تحلیل عددی
طولی	1.8	1.9	1.9	+15 بیرونی	18
	1.8	1.9	1.9	+15 داخلی	20
محیطی	1.01	1.03	1.03	+15 بیرونی	60
	1.01	1.03	1.03	+15 داخلی	45

همان‌گونه که از جدول 3 مشخص است ضریب تمرکز تنش در تنش طولی و در حل تحلیلی 1.8 است و این بدان معناست که در صورت استفاده تنها از تئوری غشایی و بدون در نظر گرفتن اثرات خمشی، در طراحی مخزن نتایج 80% خطا دارند و این نشان از اهمیت بالای استفاده از تئوری خمشی است. یکسان بودن ضریب تمرکز تنش در لایه‌های +15 بیرونی و +15 داخلی، به دلیل یکسان بودن فاصله از سطح میانی و یکسان بودن زوایا است. مقادیر بیشینه تنش طولی در لایه داخلی در پوسته استوانه‌ای و در لایه بیرونی در پوسته کروی اتفاق خواهد افتاد و این نشان از ضرورت به دست آوردن تنش‌ها در پوسته کروی است. فاصله طولی از موقعیت اتصال پوسته‌های کروی و استوانه‌ای در حل‌های تحلیلی و عددی نیز تطابق خوبی با یکدیگر دارند. با توجه به نتایج جدول 3 مشخص است تطابق خوبی بین نتایج حل تحلیلی و عددی در تنش‌های محیطی و طولی وجود دارد و در موقعیت اتصال، اختلاف نتایج نزدیک به 5% است. این درصد اختلاف به دلیل صرف نظر کردن از Q_ϕ و نسبت $\frac{dQ_\phi}{d\phi}$ به $\frac{d^2Q_\phi}{d\phi^2}$ است.

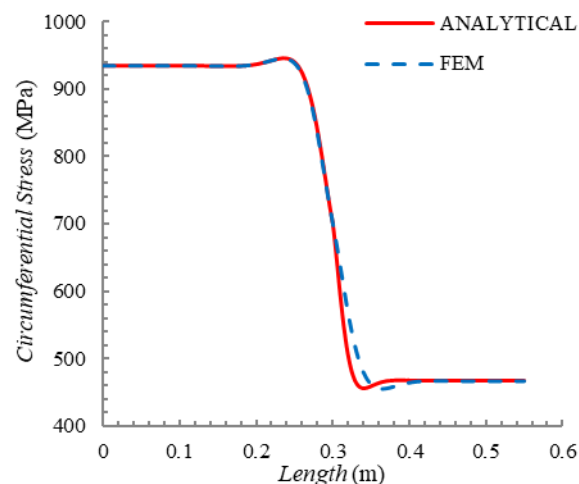


Fig. 13 Circumferential stress at the upper level +15 outside

شکل 13 تنش محیطی در سطح بالایی +15 بیرونی

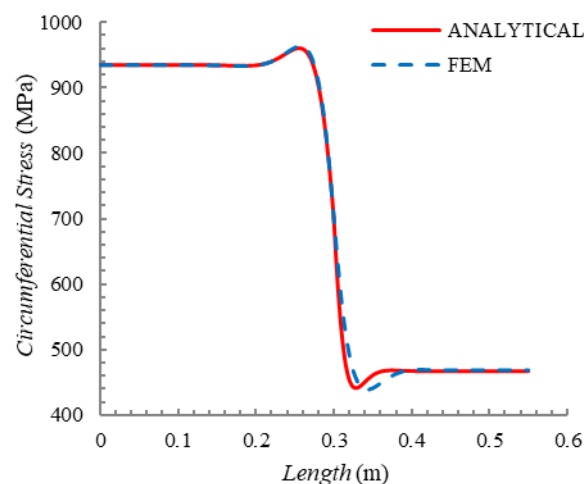


Fig. 14 Circumferential stress at the lower surface +15 internal

شکل 14 تنش محیطی در سطح پایینی +15 داخلی

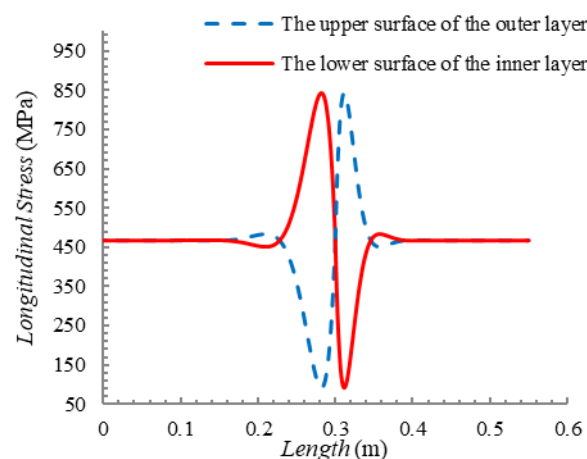


Fig. 15 Comparison of the longitudinal stresses obtained from the analytical solution on the inner +15 lower surface and the outer +15 upper surface

شکل 15 مقایسه تنش‌های طولی به دست آمده از حل تحلیلی در سطح پایینی +15 داخلی و سطح بالایی +15 بیرونی

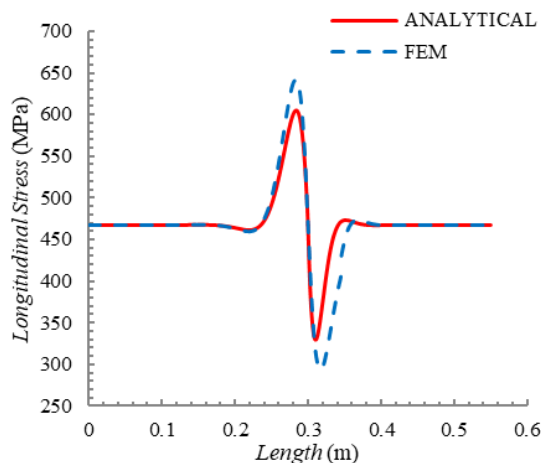


Fig. 19 Longitudinal stress on the upper surface +30 internal

شکل 19 تنش طولی در سطح بالایی +30 داخلی

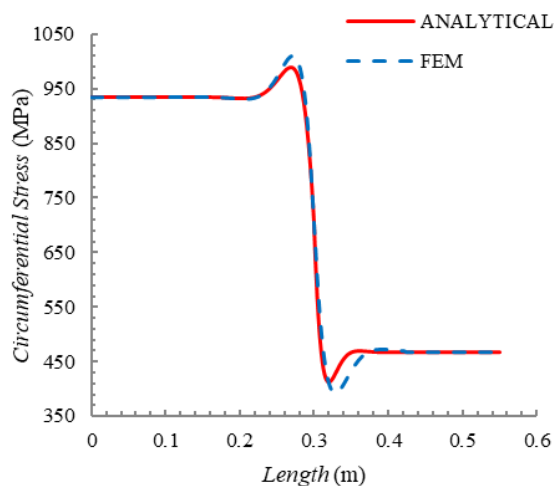


Fig. 20 Circumferential stress at the lower surface +30 internal

شکل 20 تنش محیطی در سطح پایینی +30 داخلی

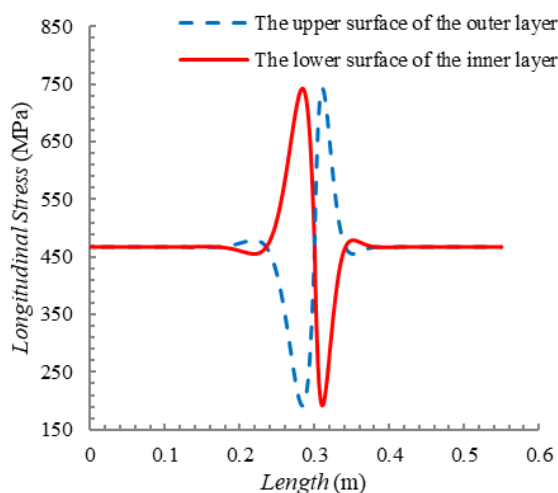


Fig. 21 Comparison of the longitudinal stresses obtained from the analytical solution on the inner +30 lower surface and the outer +30 upper surface

شکل 21 مقایسه تنش‌های طولی به دست آمده از حل تحلیلی در سطح پایینی +30 داخلی و سطح بالایی +30 بیرونی

2-5- مقایسه نتایج تحلیلی و عددی در لایه چینی متقارن $(\pm 30)_s$
در این بخش تنش‌های طولی و محیطی برای لایه چینی متقارن $(\pm 30)_s$ درجه به دست آمده از حل‌های تحلیلی و عددی در شکل‌های 16 تا 21، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

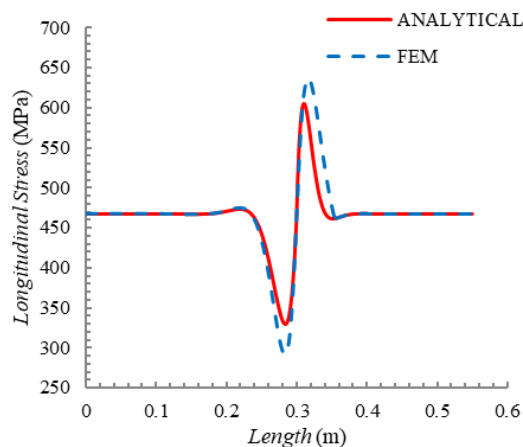


Fig. 16 Longitudinal stress at the lower surface +30 outside

شکل 16 تنش طولی در سطح پایینی +30 بیرونی

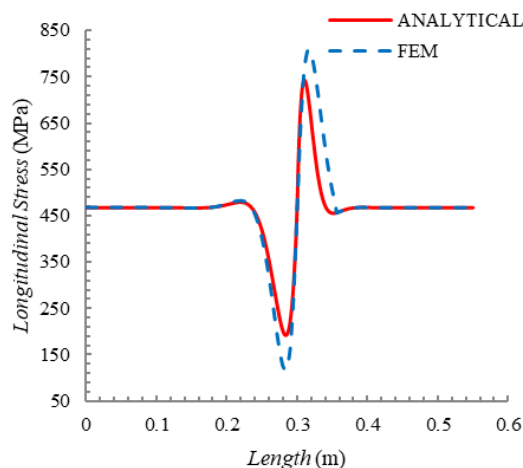


Fig. 17 Longitudinal stress on the upper surface +30 outside

شکل 17 تنش طولی در سطح بالایی +30 بیرونی

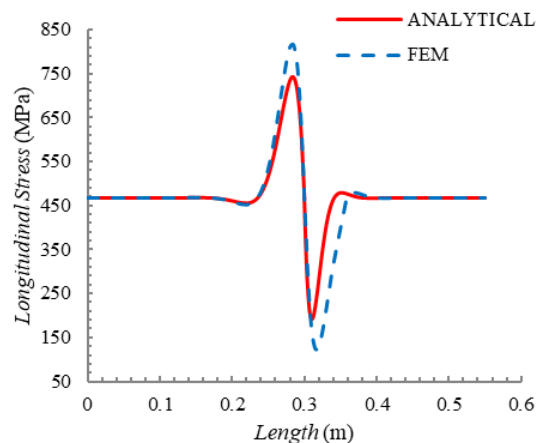


Fig. 18 Longitudinal stress at the lower surface +30 internal

شکل 18 تنش طولی در سطح پایینی +30 داخلی

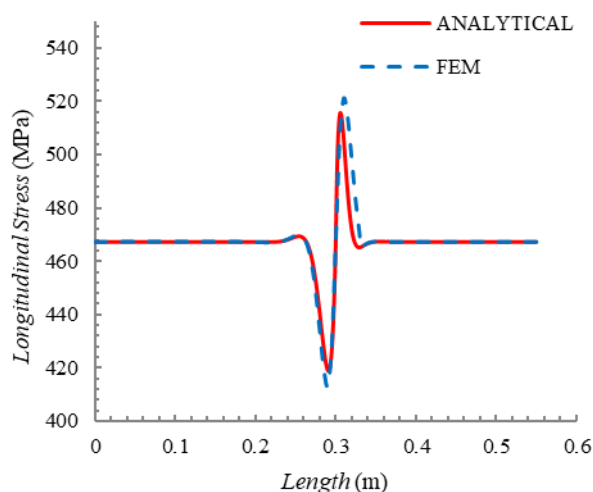


Fig. 22 Longitudinal stress at the lower surface +55 outside

شکل 22 تنش طولی در سطح پائینی +55 بیرونی

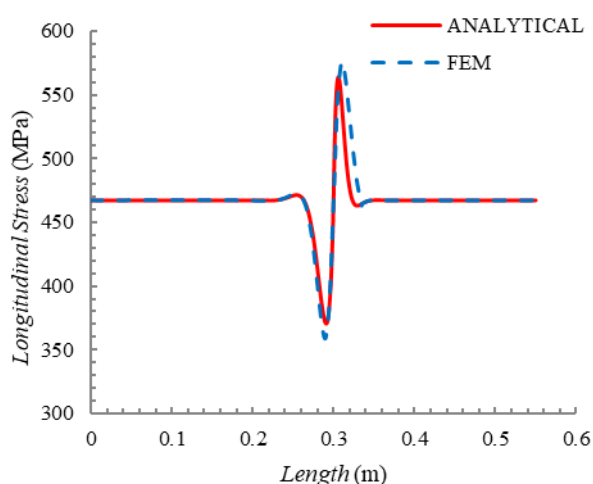


Fig. 23 Longitudinal stress on the upper surface +55 outside

شکل 23 تنش طولی در سطح بالایی +55 بیرونی

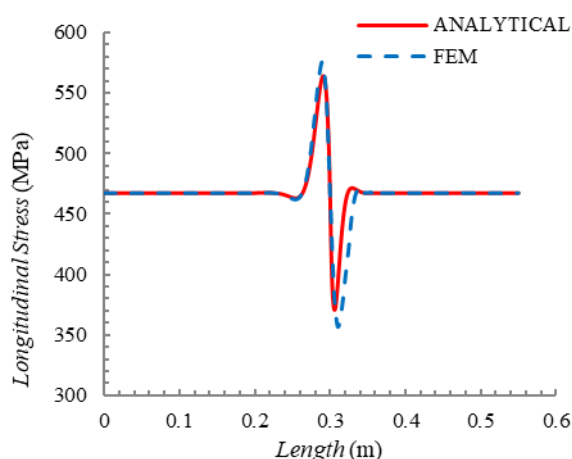


Fig. 24 Longitudinal stress at the lower surface +55 internal

شکل 24 تنش طولی در سطح پائینی +55 داخلی

همان‌گونه که از شکل‌های 16 تا 20 قابل مشاهده است برابر بودن تنش‌های غشایی طولی در استوانه و پوسته کروی با یکدیگر و 2 برابر بودن تنش‌های غشایی محیطی در استوانه نسبت به پوسته کروی، در لایه‌چینی_s (+30) نیز وجود دارد. همچنین در این زاویه لایه‌چینی نیز به دلیل ناهمگونی هندسی در ناحیه اتصال عدسی کروی و پوسته استوانه‌ای علاوه بر تنش‌های غشایی، تنش‌های خمشی نیز قابل رؤیت است. همان‌طور که در شکل 21 مشخص است مقادیر تنش‌های طولی به دست آمده از حل تحلیلی در سطح پایینی +30 درجه داخلی و سطح بالایی +30 درجه بیرونی از نظر علامت، قرینه یکدیگر هستند. ضریب تمرکز تنش‌های طولی و محیطی در دورترین لایه‌ها که بیشترین مقادیر را به خود تخصیص می‌دهند برای لایه‌چینی_s (+30) در حل‌های تحلیلی و عددی و همچنین موقعیت وقوع تنش‌های بیشینه در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 4 تنش‌های طولی و محیطی بیشینه در لایه‌چینی_s (+30)Table. 4 Maximum longitudinal and circumferential stresses in layering (+30)_s

نوع تنش	ضریب تمرکز تنش	نوع لایه	موقعیت اتصال (mm)	فاصله طولی از	
				تحلیل عددی	تحلیل عددی
طولی	ضریب تمرکز تنش	+30 بیرونی	کره	11	15
		+30 داخلی	استوانه	17	16
		+30 بیرونی	استوانه	65	65
محیطی	ضریب تمرکز تنش	+30 داخلی	استوانه	30	30
		+30 داخلی	استوانه	30	30

همان‌گونه که از جدول 4 مشخص است ضریب تمرکز تنش در تنش طولی و در حل تحلیلی 1.58 است و این نشان از خطای 58% در استفاده تنها از تئوری غشایی و بدون در نظر گرفتن اثرات خمشی است. ضریب تمرکز تنش در تنش‌های طولی نسبت به محیطی 57% بیشتر است. مقادیر بیشینه تنش طولی در لایه داخلی در پوسته استوانه‌ای و در لایه بیرونی در بخش کروی اتفاق خواهد افتاد و این نشان از ضرورت به دست آوردن تنش‌ها در پوسته کروی است. همچنین مقادیر بیشینه تنش محیطی در لایه‌های داخلی و بیرونی در بخش استوانه‌ای اتفاق خواهد افتاد. فاصله طولی از موقعیت اتصال پوسته‌های کروی و استوانه‌ای در حل‌های تحلیلی و عددی نیز تطابق خوبی با یکدیگر دارند. با توجه به نتایج جدول 4 مشخص است تطابق خوبی بین نتایج حل تحلیلی و عددی در تنش‌های محیطی و طولی وجود دارد و در موقعیت اتصال، اختلاف نتایج نزدیک به 10% است. این درصد اختلاف به دلیل صرف‌نظر کردن از Q_ϕ و $\frac{dQ_\phi}{d\phi}$ نسبت به $\frac{d^2Q_\phi}{d\phi^2}$ است.

3-5- مقایسه نتایج تحلیلی و عددی در لایه‌چینی متقارن_s (+55)

در این بخش تنش‌های طولی و محیطی برای لایه‌چینی متقارن_s (+55) درجه به دست آمده از حل‌های تحلیلی و عددی در شکل‌های 22 تا 27، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همان‌گونه که از شکل‌های 21 تا 26 قابل مشاهده است برابر بودن تنش‌های غشایی طولی در استوانه و پوسته کروی با یکدیگر و 2 برابر بودن تنش‌های غشایی محیطی در استوانه نسبت به پوسته کروی، در لایه‌چینی_s(±55) نیز وجود دارد. همچنین در این زاویه لایه‌چینی نیز به دلیل ناهمگونی هندسی در ناحیه اتصال عدسی کروی و پوسته استوانه‌ای علاوه بر تنش‌های غشایی، تنش‌های خمشی نیز قابل رؤیت است. همان‌طور که در شکل 27 مشخص است مقادیر تنش‌های طولی به دست آمده از حل تحلیلی در سطح پایینی +55 درجه داخلی و سطح بالایی +55 درجه بیرونی از نظر علامت، قرینه یکدیگر هستند. ضریب تمرکز تنش‌های طولی و محیطی در دورترین لایه‌ها که بیشترین مقادیر را به خود تخصیص می‌دهند برای لایه‌چینی_s(±55) در حل‌های تحلیلی و عددی و همچنین موقعیت وقوع تنش‌های بیشینه در جدول 5 ارائه شده است.

جدول 5 تنش‌های طولی و محیطی بیشینه در لایه‌چینی_s(±55)

Table. 5 Maximum longitudinal and circumferential stresses in layering (±55)_s

نوع تنش	تحلیلی	عددی	نوع لایه	موقعیت	فاصله طولی از موقعیت اتصال (mm)	
					تحلیل	عددی
طولی	1.21	1.23	+55 بیرونی	کره	6	9
	1.21	1.23	+55 داخلی	استوانه	8	10
محیطی	1.06	1.09	+55 بیرونی	استوانه	20	20
	1.06	1.09	+55 داخلی	استوانه	16	16

همان‌گونه که از جدول 5 مشخص است ضریب تمرکز تنش در تنش طولی و در حل تحلیلی 1.21 است و این نشان از خطای 21% در استفاده تنها از تئوری غشایی و بدون در نظر گرفتن اثرات خمشی است. ضریب تمرکز تنش در تنش‌های طولی نسبت به محیطی 15% بیشتر است. مقادیر بیشینه تنش طولی در لایه داخلی در پوسته استوانه‌ای و در لایه بیرونی در بخش کروی اتفاق خواهد افتاد و این نشان از ضرورت به دست آوردن تنش‌ها در پوسته کروی است. همچنین مقادیر بیشینه تنش محیطی در لایه‌های داخلی و بیرونی در بخش استوانه‌ای اتفاق خواهد افتاد. فاصله طولی از موقعیت اتصال پوسته‌های کروی و استوانه‌ای در حل‌های تحلیلی و عددی نیز تطابق خوبی با یکدیگر دارند. با توجه به نتایج جدول 5 مشخص است تطابق خوبی بین نتایج حل تحلیلی و عددی در تنش‌های محیطی و طولی وجود دارد و در موقعیت اتصال، اختلاف نتایج نزدیک به 3% است. این درصد اختلاف به دلیل صرف نظر کردن از Q_ϕ و $\frac{dQ_\phi}{d\phi}$ نسبت به $\frac{d^2Q_\phi}{d\phi^2}$ است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، حل تحلیلی به منظور به دست آوردن تنش‌های طولی و محیطی در پوسته کروی پوسته جدار نازک کامپوزیتی متقارن محوری با لایه‌چینی‌های متقارن_s(±15)،_s(±30) و_s(±55) تحت فشار داخلی و با در نظر گرفتن ناپیوستگی‌های تنش در موقعیت اتصال عدسی کروی و پوسته استوانه‌ای ارائه شده است. در این حل تحلیلی با استفاده از روابط تعادل، کرنش-جابجایی، انحنای-جابجایی و قانون هوک، معادلات حاکم بر پوسته‌های کروی استخراج

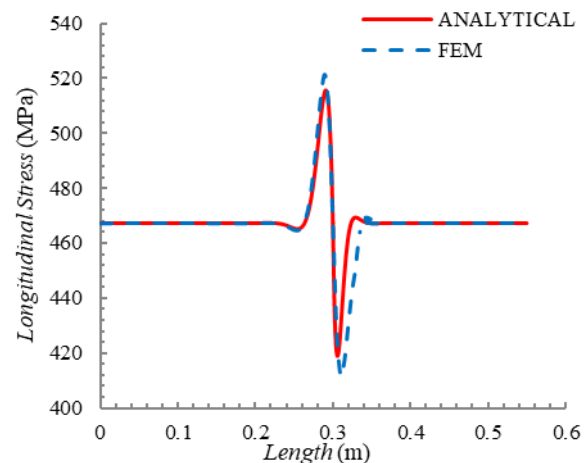


Fig. 25 Longitudinal stress on the upper surface +55 internal

شکل 25 تنش طولی در سطح بالایی +55 داخلی

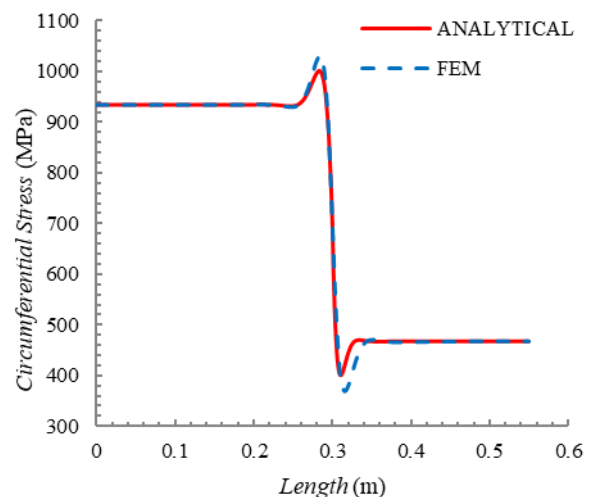


Fig. 26 Circumferential stress at the lower surface +55 internal

شکل 26 تنش محیطی در سطح پایینی +55 داخلی

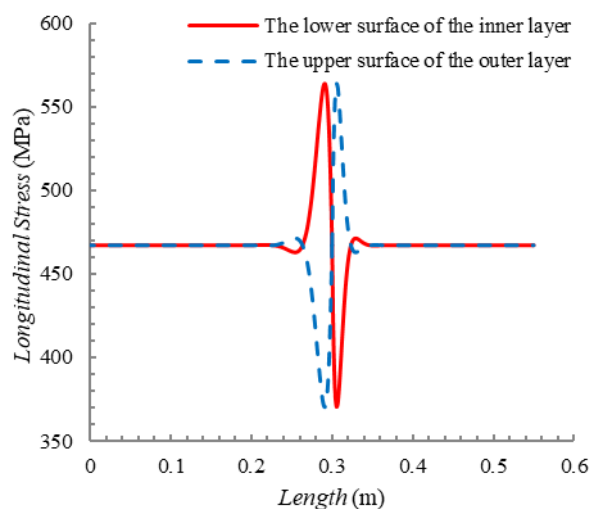


Fig. 27 Comparison of the longitudinal stresses obtained from the analytical solution on the inner +55 lower surface and the outer +55 upper surface

شکل 27 مقایسه تنش‌های طولی به دست آمده از حل تحلیلی در سطح پایینی +55 داخلی و سطح بالایی +55 بیرونی

- [9] Acar, B., "Design and validation of a filament wound composite rocket motor case," Pressure Vessels Conference, 2018.
- [10] Kumar, J., "Design and experimental validation of composite pressure vessel," Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 7, No. 4, pp. 15-19, 2018.
- [11] Houghton, D., "Discontinuity effects at the junction of a pressurized cylinder and end bulkhead," Instant Mach Engineering, Vol. 175, No. 26, 1961.
- [12] Rao, K., "Design and analysis of filament wound composite pressure vessel with Integrated-end domes," Defense Science Journal, Vol. 59, No. 1, pp. 73-81, 2009.
- [13] Musthak, M., "Prediction of structural behavior of FRP pressure vessel by using shear deformation theories," Fifth International Conference of Materials Processing and Characterization, Vol. 4, pp. 872-882, 2017.
- [14] Madhavi, M., "Study of Inter-Laminar behavior of geodesic wound composite pressure vessel by higher order shear deformation theories and finite element analysis," International Journal of Composite Materials, Vol.9, No.3, pp.60-68, 2019.
- [15] Eckold, G., "Design and manufacture of composite structures," pp. 130-139, 1994.
- [16] Kumar, J., "Discontinuity stress in orthotropic pressure vessels," Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 72, pp. 63-72, 1997.
- [17] Valery, V., "Composite pressure vessels Analysis design and Manufacturing," pp. 204-222, 1993.
- [18] Love, A., "Structural analysis of orthotropic shells," AIAA Journal, 1963.
- [19] Rahimi, G., "Experimental and numerical solution of composite Pressure vessel with metal liner," In Persian, 11th National on Construction and production Engineering, 2000.
- [20] Padovec, Z., "The analytical and numerical stress analysis of various domes for composite pressure vessels," Applied and Computational Mechanics, Vol. 16, No. 1, pp. 151-166, 2022.
- [21] Reddy, J., "Exact solutions of moderately laminated Shells. Journal of Engineering Mechanics," pp. 794-799, 1984.
- [22] Onder, A., "Burst failure load of composite pressure vessels," Composite Structures, Vol. 89, pp. 159-166, 2009.
- [23] Ramos, I., "Analytical and numerical studies of a thick anisotropic multi-layered fiber reinforced composite pressure vessel," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 2018.
- [24] Takayangi, H., "Analysis of multi layered filament wound composite pipe under internal pressure," Composite Structures, Vol.53, pp. 483-491, 2001.
- [25] Vignolia, V., "Multiscale Failure Analysis of Cylindrical Composite Pressure Vessel," Journal of Solids and Structures, Vol. 15, No. 11, 2018.
- [26] Sayya, A., "Static and free vibration analysis of laminated composite and sandwich spherical shells using a generalized higher-order shell theory," Composite structures, Vol. 219, pp. 129-146, 2019.
- [27] Ganesan, N., "Interlaminar Stress In Spherical Shells," Computer and Structures, Vol. 65, No. 4, pp. 575-583, 1997.
- [28] Salvatore, B., "A general exact elastic shell solution for bending analysis of functionally graded structures," Composite Structures, 2017.
- [29] Alavandi, B., "Three dimensional elasticity solution for static response of orthotropic doubly curved shallow shells on rectangular platform," Composite Structures, Vol. 24, pp. 67-77, 1993.
- [30] Jin, G., "Three-dimensional vibration analysis of laminated functionally graded spherical shells with general boundary conditions," Composite Structures, Vol. 116, pp. 571-588, 2014.
- [31] Timoshenko, S., "Theory of plates and shells," Mc Graw-Hill, Second Edition, 1960.
- [32] Reddy, J., "Mechanics of laminated composite plates and shells," CRC, Second Edition, 2003.
- [33] Xu, p., "Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels," Material and Design, pp. 2295-2299, 2009.
- گردید سپس با استفاده از معادلات حاکم بر پوسته استوانه‌ای مرجع [12] و به کارگیری روابط سازگاری جابجایی و چرخش، نیروها و گشتاورها در تقاطع دو پوسته به دست آورده شدند و در نهایت نیز تنش‌ها در پوسته استوانه‌ای و پوسته کروی و در هر لایه محاسبه شدند. این روابط به همراه الگوریتمی مناسب در کد متلب به کار گرفته شد. سپس نتایج حل تحلیلی با نتایج به دست آمده از حل عددی اجزاء محدود صحنه سنجی شد. نتایج به دست آمده از این صحنه سنجی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.
- تطابق خوبی بین نتایج حل تحلیلی و عددی در لایه چینی $S_{\pm 15}$ در تنش‌های محیطی و طولی وجود دارد و در موقعیت اتصال، اختلاف نتایج نزدیک به 5% است.
 - تطابق خوبی بین نتایج حل تحلیلی و عددی در لایه چینی $S_{\pm 30}$ در تنش‌های محیطی و طولی وجود دارد و در موقعیت اتصال، اختلاف نتایج نزدیک به 10% است.
 - تطابق خوبی بین نتایج حل تحلیلی و عددی در لایه چینی $S_{\pm 55}$ در تنش‌های محیطی و طولی وجود دارد و در موقعیت اتصال، اختلاف نتایج نزدیک به 3% است.
 - با استفاده از حل تحلیلی ارائه شده می‌توان تنش‌های طولی و محیطی را در هر لایه دلخواه از مخزن چندلایه کامپوزیتی به دست آورد.
 - حل تحلیلی ارائه شده با استفاده از تئوری کلاسیک پوسته‌ها کاملاً تحلیلی است و نیازی به استفاده از روش‌های عددی در حل معادلات ندارد.
 - با توجه به وقوع تنش طولی بیشینه در لایه بیرونی از پوسته کروی، استخراج نتایج تنش در پوسته کروی ضروری است.
 - نیروها در تقاطع دو پوسته با معادل‌سازی عدسی کروی با پوسته استوانه‌ای به دست نیامده‌اند بلکه از خود پوسته کروی به عنوان پوسته عدسی در استخراج بارها در موقعیت تقاطع استفاده شده است.
 - با استفاده از این حل تحلیلی می‌توان مخازن کامپوزیتی را به صورت بهینه طراحی نمود.
- ### 7- مراجع
- [1] Betti, F., "Design and development of Vega solid rocket motor composite case," Joint Propulsion Conference, 2007.
 - [2] Couroneau, N., "Predicting the mechanical behavior of large composite rocket motor cases," High Performance Structures, Vol.85, 2006.
 - [3] Matalloni, A., "Z40 solid rocket motor design status of motor case Structure," Materials & Environmental Testing, 2000.
 - [4] Erturan, Y., "Development of a structural design methodology for filament winding composite rocket motor case," Journal of Pressure Vessel and Piping, 2019.
 - [5] Betten, J., "Finite element analysis of composite pressure vessels," International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, 2003.
 - [6] Jebeli, M., Heidari-Rarani, M., "Development of Abaqus WCM plugin for progressive failure analysis of type IV composite pressure vessels based on Puck failure criterion," Engineering Failure Analysis, Vol. 131, 2022.
 - [7] Mirmohammad, SH., Safarabadi, M., Karimpour, M., Aliha, MRM., Berto, F., "Study of composite fiber reinforcement of cracked thin-walled pressure vessels utilizing multi-scaling technique based on extended finite element method," Strength of Materials, Vol. 50, pp. 925-936, 2019.
 - [8] Shahryarifard, M., Golzar, M., Safarabadi, M., "Novel Parameters in Load Capacity and Failure of Coaxial Steel Tubes Jointed by Wrapped GFRP Sleeve," International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017.



ارزیابی غیرمخرب خوردگی در لوله‌های فلزی دارای روکش کامپوزیتی با شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت‌شونده

پارسا قاسمی¹، سیاوش کاظمی‌راد^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* ایران، تهران، صندوق پستی 16846-13114، skazemirad@iust.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله:

دریافت: 1402/08/24

پذیرش: 1402/10/26

کلیدواژگان

امواج هدایت‌شونده،

پوشش کامپوزیتی،

سازه‌های پوشش دهی شده،

مدل‌سازی اجزای محدود،

فراصوت

هدف این پژوهش پیشنهاد یک روش ارزیابی غیرمخرب به وسیله گسترش امواج هدایت‌شونده برای بررسی کاهش ضخامت (خوردگی) در لوله‌های فلزی پوشش داده با کامپوزیت بوده است. ابتدا مدل اجزای محدود یک لوله فولادی به ضخامت 4 mm و قطر 200 mm پوشش‌دهی شده با کامپوزیت لایه‌ای ایجاد شد، که در آن روکش کامپوزیتی از لایه‌های نمد الیاف شیشه خرد شده و پارچه فیبر شیشه روینگ بافته شده تشکیل شده بود. سپس مود نامتقارن اساسی موج هدایت‌شونده با فرکانس 100 kHz در راستای طولی سازه گسترش داده شد و سرعت فازی موج در نمونه‌هایی با میزان خوردگی متفاوت لوله فولادی اندازه‌گیری شد. در مرحله اول، خوردگی به صورت یکپارچه در سرتاسر لوله و در مرحله بعد در قسمتی از لوله با طول مشخص و زوایای محیطی 90، 180 و 360 درجه ایجاد شد. نشان داده شد که میزان کاهش سرعت فاز موج در قسمت‌های دارای خوردگی نسبت به قسمت سالم بین 9% تا 33% برای میزان خوردگی‌های مختلف بوده است. همچنین، تشخیص وجود، محل و میزان خوردگی در قسمت فولادی لوله به کمک روش گسترش امواج هدایت‌شونده با دقت مناسبی انجام شد. نتیجه‌گیری شد که روش شبیه‌سازی گسترش امواج هدایت‌شونده می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی به منظور توسعه روش‌هایی برای ارزیابی غیرمخرب لوله‌های پوشش‌دهی شده با کامپوزیت و تشخیص محل و میزان خوردگی در آنها مورد استفاده قرار گیرد.

Nondestructive evaluation of corrosion in pipes with composite coating with the finite element simulation of guided wave propagation

Parsa Ghasemi¹, Siavash Kazemirad^{1*}

1- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, skazemirad@iust.ac.ir

Keywords

Guided waves, Composite coating, Coated structures, Finite element modeling, Ultrasound

Abstract

This study aimed to propose an NDE method based on the guided wave propagation for assessing the thickness loss (corrosion) in the metal pipes coated with composites. First, the finite element model of a steel pipe with the thickness of 4 mm and diameter of 200 mm coated with a layered composite material was developed, in which the composite coating constituted by the chopped strand glass fiber mat and woven roving glass fiber cloth layers. Then, the fundamental antisymmetric guided wave mode with the frequency of 100 kHz was propagated in the longitudinal direction of the structure and the phase velocity of the propagated wave was measured in specimens with different corrosion extent in the steel pipe. In the first step, a uniform corrosion was induced throughout the pipe, and in the next step, it was induced in a part of the pipe with a specific length and circumferential angles of 90, 180 and 360 degrees. It was shown that the reduction in the wave phase velocity in the corroded regions compared with the intact regions was between 9% to 33% for different corrosion extents. Besides, the detection of the corrosion in the steel pipe and its location and extent was properly performed using the guided wave propagation method. It was concluded that the simulated guided wave propagation method can be used as a virtual lab for the development of methods for nondestructive evaluation of pipes coated with composites and detection of the location and extent of corrosion in them.

Please cite this article using:

Ghasemi, P., Kazemirad, S., "Nondestructive evaluation of corrosion in pipes with composite coating with the finite element simulation of guided wave propagation," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2312-2319, 2024.
https://doi.org/10.22068/JSTC.2024.2015779.1866

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

1- مقدمه

امروزه مهندسان در صنعت به منظور افزایش استحکام سازه‌ها و افزایش مقاومت آن‌ها در برابر خوردگی و زنگ‌زدگی از فرآیند پوشش‌دهی¹ استفاده می‌کنند. یکی از مهم‌ترین موادی که در این فرآیند به عنوان پوشش استفاده می‌شود، کامپوزیت‌ها هستند. این مواد به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و همچنین مقاومت مکانیکی، شیمیایی و خوردگی بالایی که دارند به عنوان پوشش لایه-های فلزی در صنایع نفت و هوافضا به کار می‌روند [1]. پایش سلامت این سازه‌های چندلایه و بازرسی مداوم پوشش‌ها و لایه‌های پوشش داده شده از اهمیت بالایی برخوردار است [2]. به طور مثال ارزیابی کاهش ضخامت (خوردگی) و خواص مکانیکی لایه‌ی بستر² در لوله‌های پوشش‌دهی شده با کامپوزیت که به طور مستقیم در دسترس نیستند یکی از نیازهای صنعت است. روش‌های زیادی برای ارزیابی و آزمایش غیرمخرب³ سازه‌ها وجود دارند که هر کدام نقاط ضعف و قوت متفاوتی دارند. به دلیل محدودیت‌های این روش‌ها، بسیاری از آن‌ها برای استفاده در محیط‌های چندلایه مناسب نیستند. به طور مثال روش ارزیابی فراصوت⁴ به دلیل اختلاف امپدانس آکوستیکی بسیار زیاد بین کامپوزیت و فلز و انعکاس قابل‌توجه موج در سطح مشترک آن‌ها، در این محیط‌ها قابل استفاده نیستند [3]. عیب‌یابی توسط گسترش امواج هدایت‌شونده⁵ یکی از روش‌هایی است که برای ارزیابی و آزمایش غیرمخرب سازه‌های مختلف بسیار رایج است [4-10]. روش گسترش امواج هدایت‌شونده قابل استفاده در فرکانس‌های بالاست و در نتیجه دارای حساسیت به خرابی و قدرت عیب‌یابی بالایی است. همچنین، میرایی کم که از ویژگی‌های ذاتی این امواج است، کمک می‌کند این امواج بتوانند تا فواصل نسبتاً دور گسترش پیدا کرده و قسمت بزرگی از سازه را مورد ارزیابی قرار دهند. قابلیت ارزیابی مواد ناهمسانگرد⁶ و کامپوزیت‌ها ویژگی مهم دیگر این امواج است.

تاکنون در پژوهش‌های بسیاری از روش گسترش امواج هدایت‌شونده برای ارزیابی محیط‌های چندلایه استفاده شده است. برای مثال، وانگ و روخیلن از یک روش بازگشتی برای مطالعه گسترش موج در محیط‌های ناهمسانگرد چندلایه به کمک روش ماتریس انتقال استفاده کردند [11]. کستینگ و هوستن گسترش امواج هدایت‌شونده در محیط‌های ساندویچی تشکیل شده از لایه‌های ناهمسانگرد و ویسکوالاستیک را مورد بررسی قرار دادند و منحنی‌های پراکندگی حالت‌های گسترش را با استفاده از ماتریس انتقال به دست آوردند [12]. سیمونتی تاثیر میرایی داخلی پوشش بر سرعت فاز و تضعیف موج هدایت‌شونده را بر روی صفحات الاستیک پوشش داده شده با مواد ویسکوالاستیک مطالعه کرد [13]. کاظمی‌راد و مونزو روشی را بر اساس گسترش امواج ریلی به منظور تشخیص ویژگی‌های ویسکوالاستیک بیومواد توسعه دادند [14]. داهمن و همکاران انتشار موج هدایت‌شونده را در کامپوزیت‌های چندلایه ناهمسانگرد و ویسکوالاستیک با استفاده از رویکرد چندجمله‌ای متعامد بررسی کردند. پراکندگی و تضعیف امواج هدایت‌شونده در این روش مورد بررسی قرار گرفت [15]. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده قبلی به مسئله مستقیم گسترش امواج هدایت‌شونده پرداخته شده است که در آن خواص پراکندگی موج گسترش یافته با داشتن خواص مواد و هندسه‌ی هر لایه به دست می‌آید. با این حال توجه کمتری به مسئله معکوس گسترش امواج هدایت‌شونده شده است که در آن خواص مکانیکی، هندسه‌ی لایه‌ها و سازه و

آسیب‌های موجود در سازه با داشتن خواص موج گسترش یافته مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در برخی از مطالعات گذشته به حل مسئله معکوس گسترش امواج هدایت‌شونده جهت تهیه نقشه‌ی خوردگی و اندازه‌گیری ضخامت سازه‌ها پرداخته شده است [16-18]. برای مثال، جنوت و همکاران روشی برای اندازه‌گیری ضخامت صفحات خورده شده با استفاده از مود S₀ موج لمب پیشنهاد کردند [16]. راثو و همکاران یک روش توموگرافی موج هدایت شده اولتراسونیک بر اساس موج هدایت‌شونده برای نقشه‌برداری از خوردگی سازه-های صفحه‌مانند ارائه کردند [17]. همچنین عظیمی و همکاران یک روش غیرمخرب دو مرحله‌ای برای پایش سریع خوردگی در سازه‌های صفحه‌مانند با استفاده از گسترش امواج هدایت‌شونده پیشنهاد کردند [18]. ارزیابی نقشه‌ی خوردگی و اندازه‌گیری ضخامت کامپوزیت و دیواره‌ی فلزی در لوله‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت تا کنون در مطالعات گذشته انجام نشده است.

در برخی از مطالعات پیشین از شبیه‌سازی گسترش امواج هدایت‌شونده به روش اجزای محدود به عنوان یکی از روش‌های حل عددی استفاده شده است [19-24]. برای مثال، الین و کاولی روش اجزای محدود را برای توضیح برهمکنش امواج هدایت‌شونده و آسیب‌های ایجاد شده در سازه‌های صفحه‌ای به کار بردند [20]. راماداس و همکاران ضریب میرایی امواج هدایت‌شونده در لایه‌های مختلف یک نمونه‌ی کامپوزیتی را به دو روش آزمایشگاهی و شبیه-سازی اجزای محدود محاسبه کردند [21]. پروری و همکاران با استفاده از روش اجزای محدود و گسترش امواج هدایت‌شونده به بررسی کاهش ضخامت و میزان خوردگی در محیط‌های دو لایه‌ی فلز-کامپوزیت پرداختند [23].

هدف این مقاله پیشنهاد یک روش ارزیابی غیرمخرب بر پایه گسترش امواج هدایت‌شونده برای بررسی خوردگی در لوله‌های پوشش‌دهی شده با کامپوزیت است. همانطور که گفته شد، ارزیابی خوردگی لایه‌ی فلزی این لوله‌ها که در طی زمان با عبور سیال و یا به دلیل ایرادهای ساختی ایجاد می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش ابتدا نمونه‌ای از یک لوله‌ی فولادی با روکش کامپوزیتی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل شد و تحریک و گسترش امواج هدایت‌شونده بر روی آن انجام گرفت. سپس کاهش ضخامت در بخش‌هایی از لایه‌ی فلزی مدل اجزای محدود ایجاد شد و محل و میزان خوردگی در آن به کمک ویژگی‌های موج گسترش یافته مورد ارزیابی قرار گرفت.

2- مواد و روش‌ها

2-1- امواج هدایت‌شونده

امواج هدایت‌شونده در واقع بسته‌های موجی حاصل از برهم‌نهی موج‌های فشاری و برشی نزدیک سطح آزاد سازه‌ها می‌باشند. از مهم‌ترین ویژگی‌های امواج هدایت‌شونده می‌توان به قابلیت استفاده در فرکانس‌های بالا، میرایی پایین، حساسیت به خرابی بالا و ارزیابی سریع اشاره کرد. یکی دیگر از ویژگی-های امواج هدایت‌شونده، پراکنده‌شونده بودن آن‌ها است. به آن معنی که سرعت این امواج برخلاف امواجی مانند امواج ریلی به فرکانس تحریک وابسته است و در هر فرکانس سرعت متفاوتی دارند. همچنین این امواج می‌توانند بر خلاف امواج ریلی در یک فرکانس با مودهای متفاوت گسترش یابند [6].

⁴ Ultrasonic testing method⁵ Guided wave propagation⁶ Anisotropic¹ Coating² Substrate layer³ Non-destructive evaluation and testing

اولین لایه، در لایه دوم نمد با ضخامت 0.6 mm، در لایه سوم پارچه بافته شده یا ضخامت 0.38 mm، در لایه چهارم و پنجم نمد، مجدداً در لایه ششم پارچه بافته شده و در لایه هفتم از نمد استفاده شد که ضخامت کلی پوشش کامپوزیتی به 3.16 mm و ضخامت مجموع لوله و پوشش کامپوزیتی به 7.16 mm رسید. خواص مکانیکی صفحه فولادی و لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده در جدول 1 نشان داده شده است. همچنین هندسه لوله فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس در شکل 2 نشان داده شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی لوله فولادی و لایه‌های کامپوزیتی نمد و بافته شده [23].

Table 1 The mechanical properties of the carbon steel pipe, and mat and woven composite plies [23].

ماده	ρ (kg/m ³)	E_x, E_y (GPa)	E_z (GPa)	$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	G_{xy}, G_{yz}, G_{xz} (GPa)
فولاد	7700	200	200	0.29	-
لایه نمد	1750	26.4	26.4	0.27	-
لایه بافته شده	1750	21.74	10.56	0.27	4.6

لایه‌های فولاد و نمد همسانگرد بوده و خواص آن‌ها در همه‌ی جهات یکسان است. ولی خواص مکانیکی لایه‌ی بافته شده ناهمسانگرد بوده و در جدول 1 در مختصات کارترین داده شده است. این خواص در نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود با تعریف مختصات استوانه‌ای به جهت مناسب نسبت داده شدند. بدین منظور، خواص مکانیکی در راستای محوره‌های x و y معادل خواص مکانیکی در راستای طولی و محیطی و خواص مکانیکی در راستای محور z معادل خواص مکانیکی در راستای شعاعی در نظر گرفته شدند.

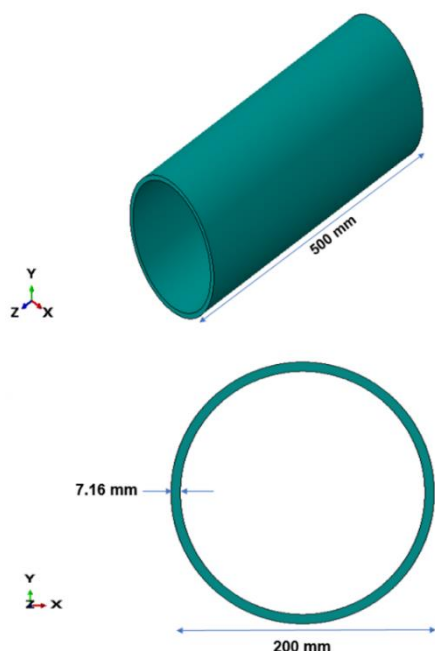


Fig. 1 Geometry of the steel pipe coated with composite material and simulated in ABAQUS.

شکل 1 هندسه لوله فولادی پوشش داده شده با کامپوزیت شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس.

با حل معادلات حاکم بر امواج هدایت‌شونده در سازه‌ها، نموداری به نام نمودار پراکندگی مودهای مختلف موج به دست می‌آید. این منحنی سرعت مودهای مختلف موج هدایت‌شونده را بر حسب فرکانس-ضخامت سازه محل گسترش موج بیان می‌کند. در ابتدای نمودار پراکندگی (در فرکانس-ضخامت‌های پایین)، تنها دو مود متقارن (S_0) و نامتقارن (A_0) اساسی موج هدایت‌شونده حضور دارند. از فرکانسی به بعد، مودهای دیگر موج هدایت‌شونده نیز ظاهر می‌شوند که به آن فرکانس قطع¹ گفته می‌شود.

ظاهر شدن مودهای مختلف موج هدایت‌شونده در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس قطع نشان‌دهنده افزایش پراکندگی در این فرکانس‌ها است. همچنین با افزایش فرکانس میرایی موج نیز افزایش پیدا می‌کند و حضور مودهای زیاد در یک محدوده فرکانسی قابلیت آشکارسازی را کاهش می‌دهد. بنابراین ناحیه قبل از خط فرکانس قطع برای ارزیابی و پایش سلامت سازه‌ها مناسب‌تر است. با توجه به طول موج کوتاه‌تر مود A_0 موج هدایت‌شونده نسبت به مود S_0 و همچنین تحریک و گسترش آسان‌تر مودهای نامتقارن، مود A_0 موج هدایت‌شونده برای انجام این پژوهش انتخاب شد.

2-2- شبیه‌سازی عددی

دو معیار مهم برای کاهش خطای شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج، بیشینه گام زمانی² و اندازه‌ی المان می‌باشند. اندازه‌ی المان باید به گونه‌ای باشد که در هر طول موج بین 10 الی 20 المان قرار بگیرد [24,23]. از آنجایی که طول موج برشی کوتاه‌تر از موج فشاری است، اندازه‌ی المان بر حسب سرعت موج برشی و طبق معادله (1) به دست می‌آید [23]:

$$l_e = \frac{\lambda_{min}}{20} \approx \frac{c_s}{20f_{max}} \quad (1)$$

در معادله‌ی بالا l_e اندازه‌ی المان، λ_{min} اندازه‌ی طول موج، f_{max} بیشینه فرکانس تحریک و c_s سرعت موج برشی است. همچنین، در یک گام زمانی با توجه به سرعت موج و اندازه‌ی المان، نباید یک طول موج به طور کامل یک المان را رد کند تا تحلیل به درستی انجام شود. بنابراین با توجه به اندازه‌ی المان به دست آمده از معادله (1)، اندازه‌ی بیشینه گام زمانی طبق معادله‌ی (2) محاسبه می‌شود:

$$\Delta t_{max} \approx \frac{(l_e)_{min}}{c_p} = \frac{1}{20f_{max}} \quad (2)$$

که در آن Δt_{max} بیشینه گام زمانی، $(l_e)_{min}$ اندازه‌ی کوچکترین المان در شبیه‌سازی و c_p سرعت موج فشاری می‌باشد.

در این مطالعه، شبیه‌سازی گسترش امواج هدایت‌شونده در لوله فولادی با روکش کامپوزیتی در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته است. نوع حلگر برای این مدل‌سازی از نوع صریح دینامیکی³ بوده و شبیه‌سازی به صورت لایه‌ای انجام شده است. به آن معنی که خواص لایه‌های مختلف کامپوزیت و فولاد به صورت جداگانه تعریف و تخصیص داده شده‌اند. لوله فولادی در نظر گرفته شده مطابق شکل 1 دارای طول 500 mm، قطر 200 mm و ضخامت 4 mm بوده است. پوشش کامپوزیتی از چهار لایه نمد الیاف شیشه خرد شده⁴ با وزن مشخصه 450 g/m²، دولا به پارچه فیبر شیشه روینگ بافته شده⁵ با وزن مشخصه 400 g/m² و رزین وینیل استر 922 Hetron تشکیل شده است. لایه فولادی در

⁴ Chopped strand glass fiber mat

⁵ Woven roving glass fiber cloth

¹ Cut-off frequency

² Maximum time increment

³ Dynamic explicit

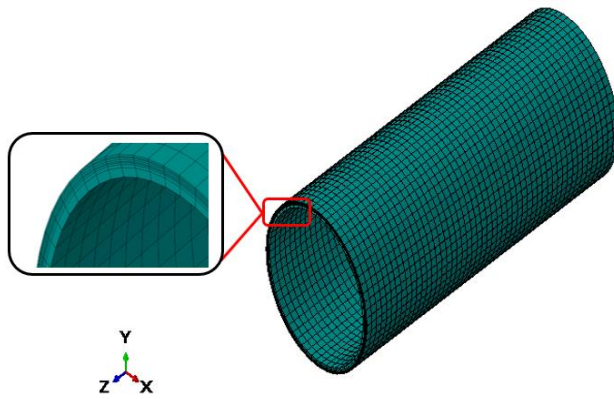


Fig. 3 The elements type used in the developed finite element model.

شکل 3 خانواده المان‌های به کار رفته در مدل اجزای محدود توسعه یافته.

برای به دست آوردن نمودار پراکندگی و همچنین اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده و ارزیابی دقت نتایج به دست آمده از نرم‌افزار GUIGUW استفاده شده است. این نرم‌افزار مبتنی بر روابط المان محدود نیمه تحلیلی⁴ است و بر اساس مسئله مستقیم گسترش امواج هدایت‌شونده عمل می‌کند. بدین صورت که با دریافت خواص مکانیکی و هندسی هر لایه از سازه، سرعت فاز مودهای مختلف موج گسترش یافته در آن را ارائه می‌کند. برای تعریف خواص لایه ناهمسانگرد سازه (لایه بافته شده) نیاز به ماتریس سفتی⁵ ارتوتوپیک می‌باشد. این ماتریس از معکوس کردن ماتریس نرمی⁶ مطابق معادله (3) به دست می‌آید. ماتریس نرمی انتقال یافته به مختصات استوانه‌ای، با نام ماتریس لخنیتسکی⁷ شناخته می‌شود و برای مسئله موجود در این پژوهش با توجه به معادله (4) به دست می‌آید.

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & 0 & 0 \\ & L_{22} & L_{23} & L_{24} & 0 & 0 \\ & & L_{33} & L_{34} & 0 & 0 \\ & & & L_{44} & 0 & 0 \\ & & & & L_{55} & L_{56} \\ & & & & & L_{66} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} S_{33} & S_{32} & S_{31} & S_{36} & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{21} & S_{26} & 0 & 0 \\ & & S_{11} & S_{16} & 0 & 0 \\ & & & S_{66} & 0 & 0 \\ & & & & S_{55} & S_{54} \\ & & & & & S_{44} \end{bmatrix} \quad (4)$$

برای ایجاد موج هدایت‌شونده در نمونه مورد نظر، یک جابجایی سینوسی متناوب با فرکانس تحریک 100 kHz و دامنه 1 mm در محل عملگر¹ به نمونه اعمال شد و مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌ها با میزان خوردگی مختلف در لایه فولادی انجام شد. مطابق شکل 3 تحریک به صورت نقطه‌ای در گوشه‌ی ابتدایی لوله و در لبه‌ی بالایی آن انجام شد. همچنین، شرایط مرزی در انتهای لوله و به صورت نقطه‌ای تعریف شد، به این صورت که دو نقطه در راستای طولی و یک نقطه در دو راستای دیگر بسته شد. برای دریافت امواج گسترش یافته در لوله، شش حسگر² مطابق شکل 2 در راستای گسترش موج در طول نمونه در فاصله‌ی 220 تا 320 میلی‌متری از لبه‌ی لوله (محل قرارگیری عملگر) و با فاصله مساوی 20 میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند و جابجایی در راستای شعاعی را بر حسب زمان ثبت کردند. سپس، سرعت فاز موج گسترش یافته روی سطح نمونه با استفاده از اختلاف فاز موج دریافتی در حسگرها اندازه‌گیری شد. یکی دیگر از پارامترهای مهم برای استخراج نتایج صحیح از شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج روی نمونه زمان حل می‌باشد. زمان حل در این مطالعه به گونه‌ای تعیین شد که امواج گسترش یافته به طور کامل به همه‌ی حسگرها برسند و همچنین از حدی بزرگ‌تر نباشد که با برخورد موج به انتهای لوله و بازگشت موج و تداخل با موج رفت گسترش یافته مشاهده شود.

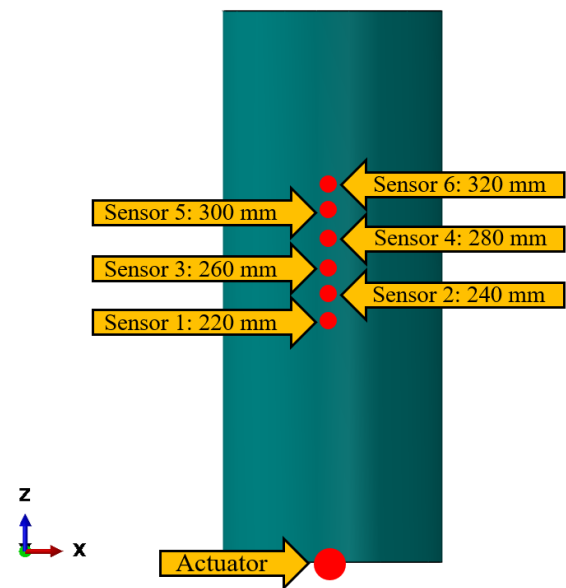


Fig. 2 The position of the actuator and sensors on the specimens.

شکل 2 جایگاه عملگر و حسگرها روی نمونه‌ها.

برای کاهش خطای شبیه‌سازی، یکدستی و یکنواختی المان‌ها در مدل اجزای محدود توسعه یافته از اهمیت زیادی برخوردار است. به همین دلیل و برای افزایش کیفیت مش‌بندی، علاوه بر قسمت‌های³ ایجاد شده، در ضخامت لوله به منظور تفکیک درست لایه‌های فولادی و کامپوزیتی نمد و بافته شده، قسمت‌های دیگری در جهت قطر لوله ایجاد شدند (شکل 3). در این پژوهش، از المان‌های سه‌بعدی مکعبی خطی هشت نقطه‌ای با انتگرال کاهش یافته و با کنترل ساعت شنی (C3D8R) استفاده شد.

¹ Actuator

² Sensor

³ Partition

⁴ Semi-analytical finite element

⁵ Stiffness matrix

⁶ Compliance matrix

⁷ Lekhnitskii



Fig. 6 Partial corrosion in the pipe with a length of 40 mm and a circumferential angle of 90 degrees.

شکل 6 خوردگی تکه‌ای در قسمتی از لوله به طول 40 میلی‌متر و زاویه محیطی 90 درجه.

3- نتایج و بحث

3-1- محاسبه سرعت فاز موج هدایت‌شونده

نمودار پراکندگی مدهای مختلف امواج هدایت‌شونده برای لوله فولاد-کامپوزیت متشکل از یک لایه لوله فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm با خواص مکانیکی داده شده در جدول 1، در شکل 7 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، فرکانس قطع که بصورت خط‌چین قرمز رنگ در شکل 7 مشخص شده است در فرکانس 174 kHz قرار دارد. همچنین مود A₀ موج هدایت‌شونده در فرکانس تحریک تعیین شده (100 kHz) دارای شیب مطلوبی است که نشان‌دهنده حساسیت بالا به خوردگی (تغییر ضخامت) در این فرکانس است.

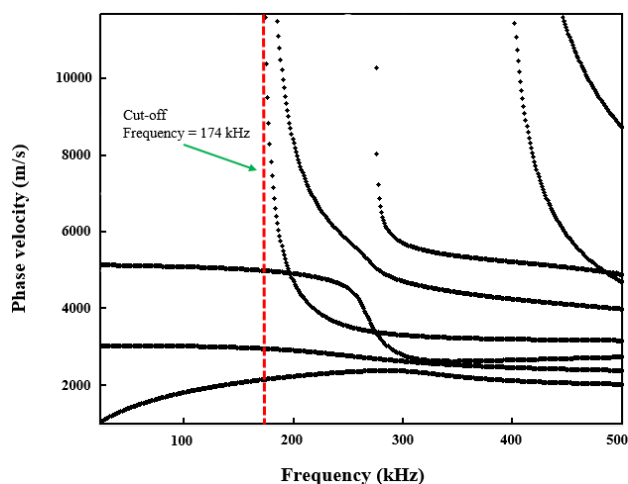


Fig. 7 The dispersion curves of guided wave modes obtained using the GUIGUW software for a 4 mm thick carbon steel pipe coated with a 3.16 mm thick composite coating.

شکل 7 نمودار پراکندگی مدهای امواج هدایت‌شونده برای لوله فولاد-کامپوزیت متشکل از یک لایه لوله فولادی با ضخامت 4 mm و پوشش کامپوزیتی با ضخامت 3.16 mm که با استفاده از نرم‌افزار GUIGUW بدست آمده است.

در مرحله‌ی اول مدل‌سازی خوردگی، خوردگی در مدل اجزای محدود به صورت یکپارچه در سرتاسر طول لوله و به صورت 360 درجه ایجاد شد. منظور از ایجاد خوردگی به صورت یکپارچه، کاهش ضخامت لوله فولادی به طور سرتاسری به عددی کمتر از 4 mm است. هدف از انجام این مرحله اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود از طریق مقایسه نتایج با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار GUIGUW بوده است. در مرحله بعدی به منظور بررسی شرایط واقعی در صنعت، خوردگی‌های تکه‌ای در قسمتی از لوله با طول ثابت 40 mm و زوایای محیطی 90، 180 و 360 درجه ایجاد شد (شکل‌های 4، 5 و 6). سپس به کمک حسگرهای قرار داده شده روی نمونه (دو حسگر قبل، دو حسگر بعد و دو حسگر در محل خوردگی) سرعت موج گسترش یافته در نواحی سالم و دارای خوردگی لوله محاسبه شده است. این نکته لازم به ذکر است که خوردگی‌های ایجاد شده همگی در راستای خط واصل عملگر و حسگرها مدل‌سازی شده و خوردگی در زوایای دیگر مورد بررسی قرار نگرفته است.

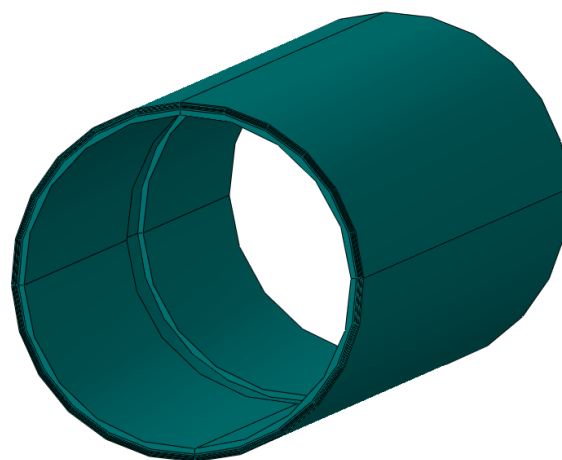


Fig. 4 Partial corrosion in the pipe with a length of 40 mm and a circumferential angle of 360 degrees.

شکل 4 خوردگی تکه‌ای در قسمتی از لوله به طول 40 میلی‌متر و زاویه محیطی 360 درجه.

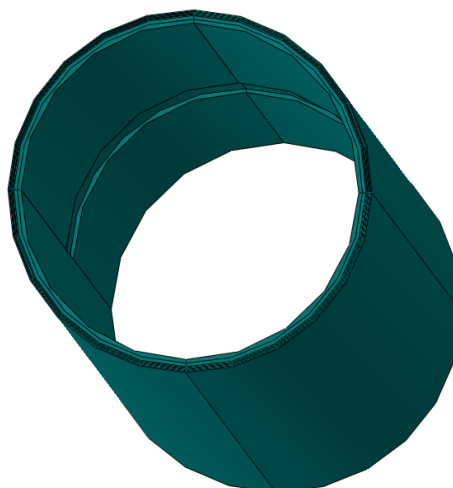


Fig. 5 Partial corrosion in the pipe with a length of 40 mm and a circumferential angle of 180 degrees.

شکل 5 خوردگی تکه‌ای در قسمتی از لوله به طول 40 میلی‌متر و زاویه محیطی 180 درجه.

جدول نشان می‌دهند که خطای موجود بین سرعت موج هدایت‌شونده بدست آمده از GUIGUW و شبیه‌سازی‌های اجزای محدود کمتر از 2% بوده که نشان دهنده دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌باشد. همچنین مشاهده شد که با افزایش میزان خوردگی در قسمت فولادی لوله (کاهش ضخامت لوله)، سرعت انتشار موج کاهش می‌یابد. به بیان بهتر، سرعت موج با ضخامت لایه‌ی فولادی رابطه‌ی مستقیم دارد که این امر با روند صعودی نمودار پراکندگی مود نامتقارن اساسی موج هدایت‌شونده برحسب فرکانس-ضخامت در فرکانس تحریک همخوانی دارد.

3-3- خوردگی 180، 360 و 90 درجه در قسمتی از لوله

سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های سالم و دارای خوردگی 360 درجه لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی در ناحیه خوردگی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود به ترتیب در جدول‌های 3، 4 و 5 ارائه شده است. همچنین درصد اختلاف نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی اجزای محدود با نتایج حاصل از GUIGUW برای نمونه سالم و دارای خوردگی یکپارچه (جدول 2) به منظور بررسی توانایی روش گسترش امواج هدایت‌شونده برای ارزیابی لوله‌های پوشش‌دهی شده دارای خوردگی تکه‌ای در این جدول نشان داده شده است. همانطور که در جدول‌های 3، 4 و 5 مشاهده می‌شود، سرعت فاز موج در قسمت‌های دارای خوردگی کوچک‌تر از سرعت در قسمت سالم بوده است. میزان کاهش سرعت فاز موج در قسمت‌های دارای خوردگی نسبت به قسمت سالم بین 9% تا 33% برای میزان خوردگی‌های (کاهش ضخامت‌های) مختلف بوده است. این مشاهده نشان دهنده حساسیت کافی مود نامتقارن اساسی موج هدایت‌شونده در فرکانس انتخاب شده نسبت به کاهش ضخامت در لوله‌های فلزی دارای پوشش کامپوزیتی است. همچنین مشاهده شد که فارغ از زاویه خوردگی، سرعت فاز موج در قسمت سالم لوله (قبل و بعد از خوردگی) در همه مدل‌های اجزای محدود ایجاد شده تقریباً یکسان و نزدیک به مقدار بدست آمده برای نمونه سالم بوده است. مورد جالب توجه در نتایج بدست آمده این است که سرعت فاز موج در قسمت‌های دارای خوردگی به زاویه محیطی خوردگی بستگی چندانی نداشته و فارغ از زاویه خوردگی، سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های دارای خوردگی تکه‌ای نزدیک به سرعت در نمونه دارای خوردگی یکپارچه با کاهش ضخامت مشابه بوده است.

جدول 2 سرعت فاز موج هدایت‌شونده در لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار GUIGUW.

Table 2 The guided wave phase velocity in the steel-composite pipe obtained for different thicknesses of the steel layer using the FE simulations and the GUIGUW software.

ضخامت لایه فولادی	سرعت موج شبیه‌سازی	سرعت موج GUIGUW	درصد اختلاف
0	1284	1279	0.4 %
1	1330	1357	2.0 %
2	1485	1505	1.3 %
3	1660	1677	1.0 %
4	1810	1831	1.1 %

جدول 3 سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های سالم و دارای خوردگی 360 درجه لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی در ناحیه خوردگی به طول 40 میلی‌متر با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود.

Table 3 The guided wave phase velocity in the intact and 360 degrees corroded parts of the steel-composite pipe obtained for different thicknesses of the steel layer in the corrosion region with the length of 40 mm using the FE simulations.

ضخامت لایه فولادی	سرعت موج خورده شده	درصد اختلاف خورده شده	سرعت موج سالم	درصد اختلاف سالم
0	1202	6.0 %	1800	1.7 %
1	1333	1.8 %	1800	1.7 %
2	1580	5.0 %	1803	1.5 %
3	1665	0.7 %	1835	0.2 %

نمونه‌ای از نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده در فاصله‌های 240، 280 و 320 میلی‌متری روی لوله فولاد-کامپوزیت در فرکانس 100 kHz در شکل 8 نشان داده شده است. همانطور که قبلاً گفته شد، سرعت فاز موج گسترش یافته روی سطح نمونه با استفاده از اختلاف فاز موج دریافتی در حسگرها اندازه‌گیری شد. برای افزایش دقت و کاهش میزان خطای محاسبه سرعت فاز موج، محاسبه سرعت با استفاده از سیگنال بدست آمده از حسگرهای مختلف انجام شد و در نهایت میانگین مقدارهای به دست آمده به عنوان سرعت فاز موج هدایت‌شونده در راستای طولی هر نمونه در نظر گرفته شد.

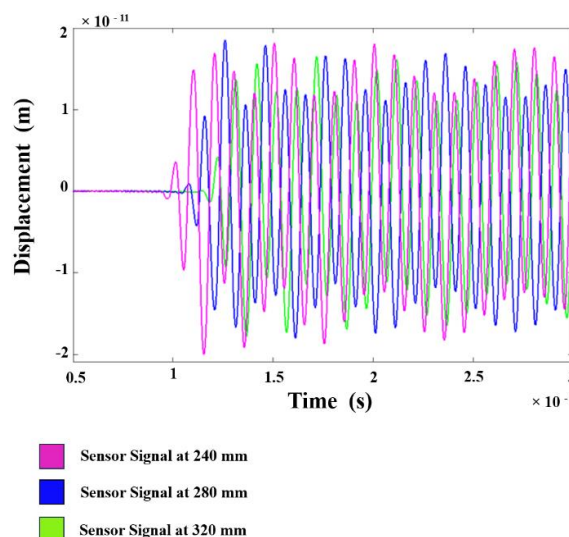


Fig. 8 The displacement-time diagram of sensors located at the distances of 240, 280, and 320 mm on the steel-composite pipe at the frequency of 100 kHz.

شکل 8 نمودار جابجایی-زمان خروجی حسگرهای قرار داده شده در فاصله‌های 240، 280 و 320 میلی‌متری روی لوله فولاد-کامپوزیت در فرکانس 100 kHz.

3-2- خوردگی یکپارچه در سرتاسر لوله

سرعت فاز موج هدایت‌شونده در لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود و نرم‌افزار GUIGUW در جدول 2 مشاهده می‌شود. نتایج ارائه شده در این

جدول 4 سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های سالم و دارای خوردگی 180 درجه لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی در ناحیه خوردگی به طول 40 میلی‌متر با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود.

Table 4 The guided wave phase velocity in the intact and 180 degrees corroded parts of the steel-composite pipe obtained for different thicknesses of the steel layer in the corrosion region with the length of 40 mm using the FE simulations.

ضخامت لایه فولادی	سرعت موج خورده شده	درصد اختلاف خورده شده	سرعت موج سالم	درصد اختلاف سالم
0	1233	3.4 %	1777	2.9 %
1	1330	2.0 %	1770	3.3 %
2	1400	6.9 %	1798	1.8 %
3	1667	0.6 %	1842	0.6 %

جدول 5 سرعت فاز موج هدایت‌شونده در قسمت‌های سالم و دارای خوردگی 90 درجه لوله فولاد-کامپوزیت محاسبه شده برای ضخامت‌های مختلف لایه فولادی در ناحیه خوردگی به طول 40 میلی‌متر با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود.

Table 5 The guided wave phase velocity in the intact and 90 degrees corroded parts of the steel-composite pipe obtained for different thicknesses of the steel layer in the corrosion region with the length of 40 mm using the FE simulations.

ضخامت لایه فولادی	سرعت موج خورده شده	درصد اختلاف خورده شده	سرعت موج سالم	درصد اختلاف سالم
0	1240	3.0 %	1802	1.6 %
1	1398	3.0 %	1800	1.7 %
2	1519	0.9 %	1860	1.6 %
3	1633	2.6 %	1800	1.7 %

4- جمع‌بندی

در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود گسترش امواج هدایت‌شونده در لوله‌های پوشش داده شده با کامپوزیت، ارزیابی غیرمخرب تغییر ضخامت این لوله‌ها در اثر خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که با افزایش میزان خوردگی در قسمت فولادی لوله (کاهش ضخامت لوله)، سرعت انتشار موج کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که تشخیص وجود، موقعیت مکانی و میزان خوردگی در قسمت فولادی لوله به کمک روش گسترش امواج هدایت‌شونده در لوله‌های پوشش داده شده با کامپوزیت امکان‌پذیر بود. نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان دادند که مود نامتقارن اساسی امواج هدایت‌شونده به خوردگی در لوله‌های فلزی پوشش‌دهی شده با کامپوزیت چه به صورت خوردگی یکپارچه و چه به صورت خوردگی تکه‌ای (در قسمتی از لوله) حساسیت خوبی نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان از شبیه‌سازی عددی اجزای محدود به عنوان یک آزمایشگاه مجازی قابل اطمینان برای بررسی کاربرد روش گسترش امواج هدایت‌شونده در ارزیابی غیر مخرب لوله‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت استفاده کرد. همچنین، در مطالعات آینده می‌توان از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای پایش وضعیت لوله‌های پوشش داده شده با کامپوزیت که دارای چند عیب به طور هم‌زمان هستند، استفاده کرد. تشخیص افت موضعی خواص مکانیکی در لوله‌های فلزی پوشش داده شده با کامپوزیت نیز می‌تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

5- مراجع

- [4] Ramezani, H., Kazemirad, S., Shokrieh, M. and Mardanshahi, A., "Effects of Adding Carbon Nanofibers on the Reduction of Matrix Cracking in Laminated Composites: Experimental and Analytical Approaches" Polymer Testing, pp. 106988, 2020.
- [5] Mardanshahi, A., Nasir, V., Kazemirad, S. and Shokrieh, M., "Detection and Classification of Matrix Cracking in Laminated Composites Using Guided Wave Propagation and Artificial Neural Networks" Composite Structures, pp. 112403, 2020.
- [6] Mardanshahi, A., Shokrieh, M. and Kazemirad, S., "Identification of Matrix Cracking in Cross-Ply Laminated Composites Using Lamb Wave Propagation" Composite Structures, Vol. 235, pp. 111790, 2020.
- [7] Fattahi, A., Ramezani, H., Shokrieh, M. M., Kazemirad S., "Detection and characterization of matrix cracking in fiber - metal laminates using Lamb wave propagation" Structural Control and Health Monitoring, Vol. 29, pp. e3039, 2022.
- [8] Riahi, M. and Ahmadi, A., "Utilization of Artificial Neural Networks for Detection and Classification of Damages in Composite Plate-Like Structures Via Ultrasonic Guided Waves," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 3, pp. 343-352, 2018.
- [9] Castaings, M., Singh, D. and Viot, P., "Sizing of Impact Damages in Composite Materials Using Ultrasonic Guided Waves" NDT & E International, Vol. 46, pp. 22-31, 2012.
- [10] Gao, F., Zeng, L., Lin, J. and Shao, Y., "Damage Assessment in Composite Laminates Via Broadband Lamb Wave" Ultrasonics, Vol. 86, pp. 49-58, 2018.
- [11] Wang, L. and Rokhlin, S., "Stable Reformulation of Transfer Matrix Method for Wave Propagation in Layered Anisotropic Media" Ultrasonics, Vol. 39, No. 6, pp. 413-424, 2001.
- [12] Castaings, M. and Hosten, B., "Guided Waves Propagating in Sandwich Structures Made of Anisotropic, Viscoelastic, Composite Materials" The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 113, No. 5, pp. 2622-2634, 2003.
- [13] Simonetti, F., "Lamb wave propagation in elastic plates coated with viscoelastic materials" The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 115, No. 5, pp. 2041-2053, 2004.
- [14] Kazemirad, S., Mongeau, L., "Rayleigh wave propagation method for the characterization of a thin layer of biomaterials" The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 133, No. 6, pp. 4332-4342, 2013.
- [15] Dahmen, S., Amor, M. B. and Ghazlen, M. H. B., "Investigation of the Coupled Lamb Waves Propagation in Viscoelastic and Anisotropic Multilayer Composites by Legendre Polynomial Method" Composite Structures, Vol. 153, pp. 557-568, 2016.
- [1] Shokrieh, M. M. and Omid, M. J., "Reinforcement of Metallic Plates with Composite Materials" Journal of composite materials, Vol. 39, No. 8, pp. 723-744, 2005.
- [2] Lee, Y.-C. and Cheng, S.-W., "Measuring Lamb Wave Dispersion Curves of a Bi-Layered Plate and Its Application on Material Characterization of Coating" IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, Vol. 48, No. 3, pp. 830-837, 2001.
- [3] Ebrahiminejad, A., Mardanshahi, A., Kazemirad, S., "Nondestructive evaluation of coated structures using Lamb wave propagation" Applied Acoustics, Vol. 185, pp. 108378, 2022.

- [16] Jenot, F., Ouafouh, M., Duquennoy, M. and Ourak, M., "Corrosion Thickness Gauging in Plates Using Lamb Wave Group Velocity Measurements" *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, No. 8, pp. 1287, 2001.
- [17] Rao, J., Ratassepp, M., Lisevych, D., Hamzah Caffoor, M. and Fan, Z., "On-Line Corrosion Monitoring of Plate Structures Based on Guided Wave Tomography Using Piezoelectric Sensors" *Sensors*, Vol. 17, No. 12, pp. 2882, 2017.
- [18] Azimi, S.A., Mardanshahi, A., Kazemirad S., "Nondestructive thickness mapping of corroded plate structures using guided Lamb wave propagation" *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, Vol. 7, No. 1, pp. 15-28, 2021.
- [19] Daryabor, P., Farzin, M. and Honarvar, F., "Calculating the Lamb wave modes in an aluminum sheet bonded to a composite layer with FEM and experiment" *Modares Mechanical Engineering Journal*, Vol. 13, No. 1, pp. 95-106, 2013.
- [20] Alleyne, D. N. and Cawley, P., "The Interaction of Lamb Waves with Defects" *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 39, No. 3, pp. 381-397, 1992.
- [21] Ramadas, C., Balasubramaniam, K., Hood, A., Joshi, M. and Krishnamurthy, C., "Modelling of Attenuation of Lamb Waves Using Rayleigh Damping: Numerical and Experimental Studies" *Composite Structures*, Vol. 93, No. 8, pp. 2020-2025, 2011.
- [22] Yang, C., Ye, L., Su, Z. and Bannister, M., "Some Aspects of Numerical Simulation for Lamb Wave Propagation in Composite Laminates" *Composite structures*, Vol. 75, No. 1-4, pp. 267-275, 2006.
- [23] Parvari, Y., Ramezani, H., Kazemirad, S., Nondestructive evaluation of bilayer metal-composite structures using finite element simulation of guided Lamb wave propagation, *Journal of Science and Technology of Composites*, 8 (2022), 1700-1701.
- [24] Mardanshahi, A., Shokrieh, M. and Kazemirad, S., "Simulated Lamb wave propagation method for nondestructive monitoring of matrix cracking in laminated composites" *Structural Health Monitoring*, Vol. 21, No. 2, pp. 695-709, 2022.



قالب پیش‌نویس مقاله برای نشریه علوم و فناوری کامپوزیت با بکارگیری امکانات استایل (سبک) در نرم‌افزار ورد (استایل عنوان)

نام و نام‌خانوادگی نگارنده اول¹، نام و نام‌خانوادگی نگارنده دوم^{2*}، نام و ... نگارنده سوم³، ... (استایل نویسندگان)

1- مرتبه علمی نگارنده، رشته تخصصی، نام سازمان، نام شهر (استایل مشخصات نویسندگان)

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 16846-13114، پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات (استایل مشخصات نویسندگان)

اطلاعات مقاله: چکیده (سبک عنوان چکیده)

دریافت:

پذیرش:

کلیدواژگان (استایل عنوان کلید واژگان)

حداقل 3، حداکثر 5 واژه، با جداکننده کاما (استایل کلیدواژگان)

بخش انگلیسی مقاله شامل عنوان تا انتهای کلید واژگان است و تمامی اجزای آن مانند بخش فارسی است. قلم انگلیسی به کار رفته در سرتاسر مقاله فقط تایمز نیو رومن است.

در این قالب (تمپلیت)، شیوه‌ی تهیه‌ی سریع ساختار مقاله با استفاده از امکانات استایل (سبک) نرم‌افزار ورد برای مجله علمی پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت شرح داده شده است. روش قالب‌بندی مقاله، بخش‌های مختلف آن، انواع قلم‌ها و اندازه آن‌ها، به‌طور کامل در استایل‌ها تهیه شده است و کافی است نویسندگان با کپی کردن متن مقاله و چسباندن (پیست) آن در بخش‌های مختلف و انتخاب استایل مربوط، مقاله خود را تهیه نمایند. نویسندگان محترم مقالات باید توجه داشته باشند، مجله از پذیرش مقالاتی که خارج از این قالب تهیه شده باشند، معذور است. برای آماده‌سازی مقاله از همین فایل و کمک گرفتن از نوار ابزار «استایل‌ها» (Styles) استفاده کنید. توجه شود که از نسخه ورد 2010 برای نگارش مقالات استفاده شود تا هماهنگی‌های لازم بین کاربران نظیر سردبیر، دبیر تخصصی، داور و ویراستار برقرار گردد. چکیده برای مقاله پژوهشی کامل حداقل 180 و حداکثر شامل 250 کلمه می‌باشد. چکیده باید به‌طور صریح و شفاف، موضوع و هدف پژوهش، روش‌های انجام و نتایج آن را مطرح کند. در چکیده از ذکر جزئیات کار، شکل‌ها، جدول‌ها، فرمول‌ها، مراجع و پاورقی پرهیز شود. لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.

A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in microsoft word (Style: English Title)

Name Surname¹, Fathollah Taheri-Behrooz^{2*}, Davoud Shahgholian³, ... (Style: Authors)

1- Name of the Department, University Name, City, Country.

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, email@address.ac.ir (Style: Authors' Affiliation)

Keywords (Style: Keywords Title)

Between 3 and 5 words, with separator comma (Style: Keywords), As:
Composites, Foam, Shear, Deflection

Abstract (Style: Abstract Title)

The abstract should briefly summarize the main contents of your contribution. It must be limited between 180 to 250 words for full research paper. The abstract should include a definition of the problem, assumptions, method of solution, summary of results. It should clearly state the objective, results and the conclusion of the work. Please do not insert any picture, diagram, table, references and other media material in your abstract. (Style: Abstract)

1- مقدمه (سبک عنوان سطح 1)

کپی و سپس چسباندن (پیست²) متن خود در این فایل، سبک³ مربوط را انتخاب نمایید. همچنین در هر قسمت از مقاله پس از پیست کردن متن می‌توانید از مسیر زیر، به طور مستقیم سبک مربوط را اعمال فرمایید:
Paste option → match with Destination format

برای آماده‌سازی مقاله خود از همین قالب (تمپلیت¹) استفاده نمایید. نوع صفحه و فواصل از اطراف، در این قالب تنظیم شده است. کافی است نویسندگان محترم، یک کپی از این فایل را در قسمتی از رایانه ذخیره نمایند. پس از آن با

³ Style

¹ Template

² Paste

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Avand, R., Ghaderi Hamidi, A., Pourabdoli, M., "A template for preparing papers in journal of science and technology of composites using styles in Microsoft word," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2320-2323, 2024. <https://doi.org/...>

...

شکل‌ها و نمودارها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند. برای این منظور، پس از کلیک روی شکل از مسیر زیر محل آن را در مکان‌های ذکر شده، مشخص نمایید:

Picture Tools -> Format -> Arrange -> Position

محورهای مختصات فقط با پارامتر توصیف می‌شوند.

عناوین افقی و عمودی شکل‌ها اگر بصورت بدون بعد باشند، غیرایتالیک می‌آیند. در غیراینصورت پارامترها بصورت ایتالیک می‌آیند (توجه شود واحدها همواره در کل شکل‌ها، نمودارها و متن مقاله بصورت غیرایتالیک می‌آیند).

نوع و اندازه قلم محور شکل‌ها تایمز نیو رومن² با اندازه 9pt است و نوع و اندازه قلم متون داخل شکل‌ها تایمز نیو رومن با اندازه 8pt است.

شکل‌ها با زمینه سفید (زمینه خاکستری و یا رنگی نباشد) و بدون قاب اضافی بیرونی و بدون خطوط افقی و عمودی (گریدلاین³) رسم می‌شود. مجله به‌صورت سیاه و سفید چاپ می‌شود. بنابراین اجزای شکل‌ها و نمودارها باید به‌گونه‌ای باشند که در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشند. به‌خصوص در شکل‌هایی که کانتور رنگی دارند، طیف رنگ استفاده شده باید در چاپ سیاه و سفید قابل تفکیک باشد.

استفاده از کلمات فارسی در شکل‌ها قابل قبول نمی‌باشد و کلیه توضیحات، ارقام، ارجاع‌ها و غیره بایستی با استفاده از کلمات و ارقام انگلیسی صورت گیرند. این کلمات و ارقام بایستی با استاندارد یکسان و مناسب در کل شکل‌های هر مقاله ارائه گردند.

در کلیه محورهای شکل‌ها باید درجه‌بندی آن‌ها روبه داخل باشد.

از نویسندگان محترم درخواست می‌گردد تا هر شکل و نموداری را به صورت یک مجموعه واحد در مقاله وارد نمایند تا از به هم‌ریختگی شکل و توضیحات آن اجتناب شود.

شکل 1، نمونه شکل با کیفیت و مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.

برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه شکل‌ها و نمودارها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

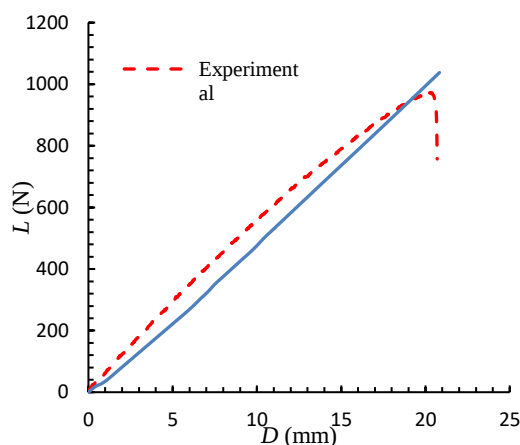


Fig. 1 Results of three-point bending test for composite plate

شکل 1 نتایج آزمون خمش سه نقطه ورق کامپوزیتی

پاراگراف‌های دوم به بعد در هر عنوان با فرورفتگی به اندازه‌ی 5 میلی‌متر از شروع سطر و بدون فاصله پس یا پیش از پاراگراف است.

موقع استفاده از علائمی نظیر ، : ، ؛ و غیره، به خاطر داشته باشید که کلیه‌ی این علائم بدون فاصله از حرف قبلی و با یک فاصله از حرف بعدی نوشته می‌شوند.

حداکثر صفحات پیش‌نویس مقاله 15 صفحه (با رعایت قالب فعلی) است. (استایل متن اصلی)

1-1- اشاره به مراجع (استایل عنوان سطح 2 و 3)

اشاره به مراجع با علامت [1] در متن مقاله شروع می‌شود و بقیه مراجع نیز به ترتیب ادامه می‌یابند. مراجع باید به ترتیب ارجاع در متن شماره‌گذاری شوند و نمی‌توان به مرجع شماره 4 زودتر از مرجع شماره 3 اشاره کرد. در اشاره به چند منبع پشت سر هم، به جای ذکر تک‌تک آن‌ها می‌توان یک‌جا اشاره کرد [3-6] و برای اشاره به دو یا چند منبع غیرمتوالی در داخل براکت از جداکننده کاما استفاده می‌شود [3,5,7].

از ارجاع به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-15]" خودداری شود. در مقاله‌های پژوهشی ارجاع باید به طور عمده در بخش‌های اصلی مقاله صورت گیرد. مراجعی که فقط در مقدمه آورده شده‌اند در واقع مرجع پژوهش نیستند و تعداد آن‌ها باید اندک باشد.

1-2- اعداد و کلمات انگلیسی (استایل عنوان سطح 2 و 3)

در مقاله‌ی فارسی استفاده از کلمات انگلیسی¹ مجاز نیست و حتماً باید معادل فارسی آن‌ها را در متن مقاله به کار برد. در صورت لزوم، اصل انگلیسی کلمات به‌صورت زیرنویس اشاره شود.

در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، بایستی تمامی اعداد مقاله به صورت انگلیسی تایپ شوند و از به کار بردن ممیز فارسی خودداری شود. به طور مثال 1.2 صحیح و 1/2 غلط می‌باشد.

اشاره به زیرنویس در هر صفحه از مقاله با عدد 1 شروع می‌شود. باید توجه کرد که از زیرنویس وقتی استفاده می‌شود که اولین بار آن کلمه در متن مقاله استفاده می‌شود و در دفعات بعدی نیازی به تکرار زیرنویس نیست.

2- شکل‌ها، نمودارها و جدول‌ها (استایل عنوان سطح 1)

شکل‌ها، جدول‌ها و نمودارها نیز با فرمت دوستونی در مقاله درج می‌شوند. در صورتی که نتوان آن‌ها را در اندازه یک ستون رسم نمود، و شکل مطلوب بیش از عرض یک ستون را اشغال کند، در بالا یا پایین صفحه و بعد از محل ارجاع درج می‌شوند. (استایل متن اصلی)

2-1- شکل‌ها و نمودارها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم شکل‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- در راستای نمایه شدن مجله در پایگاه‌های معتبر استنادی بین‌المللی، شکل‌ها و نمودارها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند. عنوان شکل‌ها در زیر شکل قرار می‌گیرند (عنوان شکل به صورت انگلیسی در زیر شکل و سپس عنوان فارسی در زیر عنوان انگلیسی قرار می‌گیرد).
- عنوان فارسی شکل بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی شکل بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
- به همه‌ی شکل‌ها و نمودارها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به شکل‌ها در متن، با ذکر شماره شکل و همان سبک متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.

¹ English (Style: Sub Title)

² Times New Roman

³ Gridlines

2-2- جدول‌ها (استایل عنوان سطح 2 و 3)

نکات کلی که باید در ترسیم جدول‌ها به آن دقت شود، عبارت است از:

- جدول‌ها باید دارای هر دو عنوان فارسی و انگلیسی باشند که در بالای جدول قرار می‌گیرند (عنوان جدول به صورت فارسی بالاتر از عنوان انگلیسی قرار دارد).
 - عنوان فارسی جدول بایستی به صورت راست‌چین و عنوان انگلیسی جدول بایستی به صورت چپ‌چین باشد.
 - جدول‌ها حتی‌الامکان فقط با سه خط افقی اصلی و بدون خطوط عمودی تنظیم می‌شوند.
 - به همهی جدول‌ها در مقاله باید اشاره کرد. اشاره به جدول‌ها در متن، با ذکر شماره جدول و همان سایز متن مقاله و بدون پرانتز است. مگر در پایان جمله که در این حالت در داخل پرانتز اشاره می‌شود.
 - جدول‌ها در هر صفحه در بالا و یا پایین هر ستون بعد از اولین ارجاع به آن جانمایی شوند.
 - استفاده از اعداد فارسی در جدول‌ها قابل قبول نمی‌باشد.
 - در صورتی که از جدول‌های سایر منابع استفاده شود، ذکر شماره مرجع در هر دو عنوان فارسی و انگلیسی جدول ضروری می‌باشد.
 - متون داخل جدول‌ها باید به زبان فارسی و با قلم بی‌نازنین در اندازه 9pt تهیه شوند. استفاده از پارامترهای تعریف شده در جداول بخصوص سرستون‌ها بلامانع است. اندازه قلم برای پارامترهای انگلیسی و لاتین، 7pt با نوع قلم تایمز نیو رومن می‌باشد.
 - جدول‌ها را به صورت زمینه سفید تهیه نمایید. از زمینه‌های رنگی و خاکستری در تهیه جدول‌ها پرهیز نمایید.
- جدول 1 نمونه صحیح جدول مورد تایید مجله را نشان می‌دهد.
- برای توضیحات تکمیلی‌تر در مورد تهیه جدول‌ها مورد تأیید مجله، به فایل راهنمای تهیه شکل‌ها و نمودارها مراجعه کنید.

جدول 1 اندازه فونت‌ها (استایل: عنوان جدول)

Table 1 Fonts sizes (Style: Table Title)

زبان متن	فارسی	لاتین
نوع قلم	بی‌نازنین	تایمز نیو رومن
اندازه قلم		
عناوین بخش‌های سطح 1	10	9
عناوین بخش‌های سطح 2	9	8
متن اصلی مقاله	10	9
عنوان شکل‌ها و جدول‌ها	9	8
متن داخل شکل‌ها	---	8
پاورقی و پی‌نوشت	8	7
متن در جدول‌ها	9	8
فرمول‌ها ^(*)	9	9
شماره روابط	---	9
مراجع	---	8

^(*) فونت فرمول لاتین می‌تواند کامبریا مَث نیز باشد.

3- روابط و فرمول‌های ریاضی (استایل عنوان سطح 1)

روابط و فرمول‌های ریاضی با استفاده از ابزار معادله¹ موجود در نرم‌افزار آفیس با قلم کامبریا مَث 9pt² و از سمت چپ تایپ می‌شوند و با شماره‌گذاری از یک

مشخص شده و برای اشاره به آن‌ها از شماره فرمول در داخل پرانتز استفاده می‌شود. یادآور می‌شود در نسخه‌های 2007 به بعد نرم‌افزار آفیس، فونت کامبریا مَث به‌طور پیش‌فرض برای نوشتن روابط و فرمول‌ها بکار رفته و کافی است اندازه آن در ابزار معادله تغییر کند. حتی‌المقدور برای تایپ فرمول‌ها از نرم‌افزار مَث‌تایپ³ استفاده نشود.

در نوشتن فرمول‌ها رعایت نکات زیر الزامی است:

- 1- در فرمول‌نویسی پارامترها و متغیرها به صورت ایتالیک می‌آیند، ولی اعداد، کلمات، توابع مشخص و واحدها به صورت غیرایتالیک می‌آیند.
- 2- در صورتی که فرمول طولانی باشد و طول آن از یک سطر تجاوز کند، باید در جای مناسب شکسته شده و ادامه فرمول در سطر بعدی آورده شود و از فشرده کردن آن پرهیز شود.
- 3- وقتی ادامه فرمول در سطری بعدی آورده می‌شود، باید از سطر دوم به بعد از سمت چپ فرورفتگی داشته باشد.
- 4- شماره هر فرمول در گوشه سمت راست آخرین سطر فرمول درج می‌شود و در صورتی که در سطر آخر برای نوشتن شماره فرمول جا نباشد، در گوشه سمت راست سطر بعد نوشته می‌شود.
- 5- دقت شود از نقطه ممیز یا همان نقطه پایان جمله $(a.b)$ به جای نقطه ضرب $(a \cdot b)$ استفاده نشود.

$$\overline{Q_{11}^K} = Q_{11}^K \cos^4 \theta^k + 2(Q_{12}^K + Q_{66}^K) \sin^2 \theta^k \cos^2 \theta^k + Q_{22}^K \sin^4 \theta^k \quad (1)$$

$$\Pi = \int_{t_0}^{t_1} \sum_{i=1}^{N_0} (T_i - U_i + W_i) dt \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy}^0 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (a-3)$$

4- قواعد نوشتاری (استایل عنوان سطح 1)

تلاش شود در متن مقاله از جملات رسا، گویا و کوتاه استفاده شود و از نوشتن جملات تودرتو پرهیز شود. جداسازی اجزای مختلف یک جمله نیز نقش زیادی در فهم آسان آن دارد. درستی نوشتار بر پایه‌ی املای زبان پارسی ضروری است. در این بخش، برخی از موارد اشتباه متداول یادآوری می‌شود.

در افعال حال و گذشته استمراری باید دقت شود که «می» از جزء بعدی فعل جدا نماند. برای این منظور از «فاصله‌ی متصل» استفاده کنید. برای نوشتن فاصله‌ی متصل از «کلید Ctrl» به همراه «کلید -» استفاده کنید. همچنین دقت کنید که جزء «می» و جزء بعدی فعل را به‌صورت یکپارچه ننویسید. بنابراین «می‌شود» و «میشود» اشتباه، و درست آن «می‌شود» است.

در مورد «ها»ی جمع نیز دقت کنید که از کلمه‌ی جمع بسته شده جدا نوشته شود. برای جدانویسی نیز از فاصله‌ی متصل استفاده کنید. مثلاً «شکل‌ها» را به‌صورت «شکل‌ها» بنویسید. جمع بستن کلمات پارسی یا لاتین با قواعد زبان عربی اشتباه است. بنابراین، «پیشنهادهات» و «اساتید» اشتباه و درست آن‌ها «پیشنهاده‌ها» و «استادان» است.

1-4- علائم، نشانه‌ها و ارقام (استایل عنوان سطح 2 و 3)

از علائم و نشانه‌های متداول در زبان فارسی و همچنین از علائم و نشانه‌های به‌کار رفته در متون مهندسی مکانیک می‌توان استفاده نمود. استفاده از ممیز

³ Math Type

¹ Insert -> Symbols -> Equation

² Cambria Math

تذکر: برای نوشتن مراجع می‌توانید از فایل استایل مخصوص نشریه علوم و فناوری کامپوزیت¹ در نرم‌افزار اندنوت² استفاده کنید. این فایل از طریق وب-سایت مجله در دسترس است و برای استفاده از آن کافی است به پوشه استایل، در محل نصب نرم‌افزار انتقال یابد. این پوشه معمولاً در مسیر زیر در دسترس است:

Program Files → EndNote X# → Styles

برای مراجع فارسی در این نرم‌افزار کافی است در قسمت زبان³ مرجع، عبارت (In Persian) درج شود.

مقالات در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی، نام، عنوان، نام مجله، شماره جلد، صفحات ابتدایی و انتهایی و سال انتشار.

(توجه شود حروف اول در عناوین مقالات بخش مراجع همه بزرگ باشند)

مثال:

- [1] Switzky, H. and Cary, J. W., "Minimum Weight Design of Cylindrical Structures," AIAA Journal, Vol. 1, No. 10, pp. 2330-2337, 1963.

مراجع فارسی زبان باید به صورت معادل انگلیسی آن‌ها درج شده و از عبارت In Persian استفاده شود مانند:

- [2] Safarabadi, M., "More Accurate Evaluation of Curing Residual Stress Field Considering Interphase Characteristics," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 1, No. 1, pp. 3-12, 2014.

کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر آورده می‌شوند:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ، شماره صفحه و سال انتشار.

مثال:

- [3] Timoshenko, S., "Strength of Materials, Part II, Advanced Theory and Problems," Third ed., Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 1976.

پایان نامه‌ها:

- [4] Carlson, W. R., "Dialectic and Rhetoric in Pierre Bayle," MSc Thesis, Yale University, USA, 1977.

ثبت اختراع:

- [5] Chin D.A. and Irvin D.J., "Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel," US Pat. 6, 685, 442, 2004.

پایگاه‌های الکترونیکی:

- [6] Mauritz K., "Sol-gel Chemistry," <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, available in 13, February 2005.

استانداردها:

- [7] Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, 06.04, D 4493-94, 2000.

فارسی خطر به هم ریختگی اعداد را دارد و استفاده از آن به هیچ وجه مجاز نیست. اندازه و قلم علایم در داخل فرمول و در داخل متن و در لیست علایم باید دقیقاً یکسان باشد.

در صورت نیاز، لیست علایم و نشانه‌ها، در انتهای مقاله و پیش از مراجع درج می‌شود. این لیست به صورت جدول دوستونی و ترتیب الفبایی تنظیم شده و هر سطر به ترتیب شامل نماد و شرح (و ابعاد) آن است. مثال:

5- فهرست علائم (استایل عنوان سطح 1)

E مدول یانگ (Nm^{-2})

P نیرو (Nm^{-2})

T دما (K)

علایم یونانی

σ تنش (Nm^{-2})

ε کرنش

بالانویس‌ها

k تعداد لایه

زیرنویس‌ها

cr بحرانی

Ave مقدار متوسط

6- تقدیر و تشکر و پیوست‌ها (استایل عنوان سطح 1)

در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست علایم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.

7- مراجع (استایل عنوان سطح 1)

تمامی مراجع با قلم تایمز نیو رومن 8 نوشته می‌شوند. شماره مرجع داخل کروشه و با ایجاد بیرون‌زدگی 5 میلی‌متر از خط دوم هر مرجع، نوشته می‌شود. نکات زیر را در مرجع‌نویسی و استفاده از مراجع رعایت نمایید:

- ✓ لازم به ذکر است که حداقل 15 درصد از مراجع استفاده شده در مقاله باید از مجلات علمی-پژوهشی داخل کشور انتخاب شود.
- ✓ نقطه، فاصله، کاما، ساده بودن فونت‌ها در مرجع‌نویسی باید با همان دقتی که در نمونه‌ها به آن اشاره شده است، رعایت شود.
- ✓ مجدداً تاکید می‌شود از ارجاع گروهی به مراجع به صورت: "در این موضوع محققان بسیاری تحقیق نموده‌اند [2-10]" خودداری شود.
- ✓ مراجع استفاده شده در مقاله باید قابل دسترس و قابل استفاده برای خوانندگان باشد.
- ✓ از ارجاع به مدارک قدیمی، بی ارتباط با اهداف اصلی مقاله و مطالبی که به صورت توضیحات و قوانین آشکار و آشنا برای مهندسان است، خودداری نمایید. به عنوان مثال، "قانون دوم نیوتن بصورت زیر است [5]". این نوع ارجاع نادرست است و کمکی به خواننده در درک مطلب نخواهد داشت.
- ✓ از ارجاع به پایان‌نامه‌های کارشناسی خودداری نمایید.
- ✓ نام مجله‌ها و نظایر آن به‌طور کامل و بدون اختصار آورده شود.

³ Language

¹ JSTC.ens (EndNote Style)

² EndNote